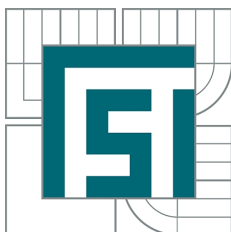


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

INTEGRACE ZAŘÍZENÍ ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ ODPADŮ DO SÍTĚ CENTRÁLNÍHO ZÁSOBOVÁNÍ TEPLEM S EXISTUJÍCÍ TEPLÁRNOU

INTEGRATION OF WASTE-TO-ENERGY PLANT INTO THE DISTRICT HEATING
NETWORK WITH EXISTING HEATING PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VÁCLAV KOPECKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ PUTNA

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Václav Kopecký**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Putna**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Integrace zařízení energetického využití odpadů do sítě centrálního zásobování teplem s existující teplárnou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Dostatečný odbyt tepla vyrobeného v zařízení energetického využití odpadů (EVO) za odpovídající cenu je vedle příjmů za zpracování odpadů hlavní podmínkou dobré ekonomiky projektu. Bakalářská práce je zaměřena na problematiku integrace zařízení energetického využití odpadů do sítě centrálního zásobování teplem (CZT) s dalším tepelným zdrojem. V rámci práce bude navržen postup, jakým lze stanovit optimální režim dodávek tepla z obou zařízení na měsíční bázi, přičemž budou zohledněny změny v poptávce v kratších časových úsecích. Brány v úvahu pak budou některé parametry stávajícího tepelného zdroje, jako je možný rozsah jeho výkonu nebo minimální doba odstávky.

Cíle bakalářské práce:

- Získání základních znalostí v problematice energetického využití odpadů a teplárenství
- Vyhodnocení možných limitujících faktorů ovlivňujících dodávky tepla do sítě CZT z více zdrojů
- Návrh metodiky pro hodnocení integrace zařízení energetického využití odpadů do sítě centrálního zásobování teplem na měsíční bázi
- Analýza optimálního řešení spolupráce zařízení EVO a teplárny v rámci jedné sítě CZT v konkrétním případě

Seznam doporučené literatury:

Heat Roadmap Europe, A low-carbon heating and cooling strategy for Europe, <http://www.heatroadmap.eu/>, přístup 15. listopadu 2015

Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (2011-2015): Energie aus Abfall, Band 7-11, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin.

Li, P., Nord, N., Ståle, I., Ertesvåg, I. S., Ge, Z., Yang, Z., Yang, Y. (2015): Integrated multiscale simulation of combined heat and power based district heating system. Energy Conversion and Management, roč. 106, s. 337–354. ISSN 0196-8904.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem vše vypracoval samostatně, za použití informací, získaných z odborných konzultací nebo literárních či jiných zdrojů, uvedených v závěru práce.

Václav Kopecký

Rád bych poděkoval zejména Ing. Putnovi za odborné vedení práce, Ústavu procesního inženýrství za poskytnutí dat a modelů pro vypracování této práce, a v neposlední řadě své rodině, která mi vytvořila kvalitní zázemí pro tvorbu práce.

Václav Kopecký

Abstrakt

Tato práce je věnována shrnutí současného stavu odpadového hospodářství a představení možností pro rozšíření strategie energetického využívání odpadu. Práce je dělena na 4 hlavní části, z nichž každá popisuje část této problematiky, nebo problematiku přímo s ní spojenou. Nejprve práce představuje situaci odpadového hospodářství v ČR z několika různých pohledů. Dále představuje systémy centrálního zásobování teplem, které tvoří dobrou základnu pro stavbu zařízení, která spalují odpad. Poslední dvě kapitoly jsou pak věnovány problémům, spojeným s vytvářením projektů nových zařízení, a optimalizačním modelům, které umožňují vytvářet projektovou dokumentaci, která více odpovídá realitě.

Summary

The main two goals of this thesis are summarization of current state of waste management policies in the Czech Republic and introduction of possibilities connected with waste-to-energy strategy. This thesis is divided to 4 sections, each of them focused around different part of this complex problem, or issues directly connected to it. In the first part, state of waste management in the Czech Republic is discussed from several different points of view. Then, district heating is introduced as a solid platform for waste-to-energy facilities. The last two chapters present several other issues, connected with construction of new waste-to-energy plants and methods of optimization of long term rentability models.

Klíčová slova

odpad, odpadové hospodářství, spalování odpadu, kogenerace, centralizované zásobování teplem, optimalizace

Keywords

waste, waste management, waste incineration, cogeneration, district heating, optimization

KOPECKÝ, V. *Integrace zařízení energetického využití odpadů do sítě centrálního zásobování teplem s existující teplárnou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 42 s. Vedoucí Ing. Ondřej Putna.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 2 |
| 1 Výroba tepelné energie z komunálního odpadu | 3 |
| 1.1 Výhody spalování komunálního odpadu | 3 |
| 1.2 Energetické využití odpadu z hlediska české a evropské legislativy | 5 |
| 1.2.1 Legislativní předpisy v ČR | 5 |
| 1.2.2 Legislativní předpisy v EU | 7 |
| 1.3 Technologie výroby tepla | 9 |
| 1.3.1 Obecný popis centrály pro výrobu tepla | 9 |
| 1.3.2 Kogenerace a pojem teplárna | 9 |
| 1.3.3 Výroba tepla z odpadu | 11 |
| 1.4 Složení a výhřevnost odpadu | 12 |
| 2 Centrální zásobování teplem | 13 |
| 2.1 Technologie dálkového vytápění | 13 |
| 2.1.1 Zdroje dodávek tepla v rámci CZT | 14 |
| 2.1.2 Primární rozvody tepla | 15 |
| 2.1.3 Spotřebitelské předávací stanice a sekundární rozvody | 18 |
| 2.2 Stav sítí centrálního zásobování teplem v ČR | 19 |
| 2.3 Srovnání centrálního a individuálního zásobování teplem | 19 |
| 2.4 Fluktuace poptávky po teple | 21 |
| 3 Integrace spalovny odpadu do sítě CZT | 24 |
| 3.1 Ekonomické plánování ZEVO | 24 |
| 3.1.1 Pokrytí nákladů za svoz odpadu | 25 |
| 3.2 Logistické plánování ZEVO | 26 |
| 3.3 Další faktory při plánování ZEVO | 26 |
| 4 Dimenzování výkonu zařízení EVO | 28 |
| 4.1 Flukтуаční koeficienty | 28 |
| 4.2 Jednoduchý korekční koeficient na měsíční bázi | 29 |
| 4.2.1 Výpočetní postup | 29 |
| 4.2.2 Prezentace výsledků | 30 |
| 4.2.3 Shrnutí příkladu a vyhodnocení výsledků | 32 |
| 4.3 Korekční koeficient zohledňující více faktorů | 32 |
| 4.3.1 Výpočetní postup | 33 |
| 4.3.2 Vyhodnocení výsledků | 34 |
| 4.3.3 Shrnutí příkladu a vyhodnocení výsledků | 37 |
| Závěr | 38 |
| Literatura | 38 |
| Seznam použitých zkratk | 42 |

ÚVOD

Trvale udržitelný ekonomický rozvoj je v dnešní době často diskutovaným společenským tématem. Významnou podmínkou pro jeho dosažení je pak vyspělé odpadové hospodářství. Součástí takového plánu je právě i energetické využití odpadu. To se však, při uvádění do praxe, potýká s řadou problémů, ať již legislativního nebo technického rázu. Jejich řešení tvoří základní předpoklad pro realizaci projektů energetického využití odpadů (dále jen EVO) v budoucnosti.

Využití odpadu pro výrobu energie, ať již tepelné nebo elektrické, se přitom jeví pro dosažení udržitelného rozvoje jako naprosto zásadní, společně s recyklací materiálu. Země, ve kterých dosahuje podíl recyklovaného odpadu vysokých čísel (ve srovnání s ostatními zeměmi) má obvykle i velký podíl odpadu, který je energeticky využíván. Další možností nakládání s materiálově nevyužitelným odpadem je neekologické skládkování, kterému se dnes snaží většina vyspělých zemí předcházet. EVO představuje ke skládkování nejzajímavější alternativu, především z důvodu významné redukce objemu odpadu, ale také vzhledem k jeho smysluplnému využití.

Zařízení, která energeticky využívají odpad (dále pouze ZEVO), jsou navíc poměrně drahá a náročná na výstavbu. Z čistě ekonomického hlediska se tedy nemusí na první pohled jevit jako optimální řešení dodávek energie. I proto je tedy důležité promyšlené plánování při výstavbě těchto zařízení, aby nemusela být závislá pouze na nejisté státní podpoře, ale byla schopná generovat investorům zisk sama od sebe, neboť z dlouhodobého hlediska neexistuje jiná možnost, jak rozumně nakládat s odpadem.

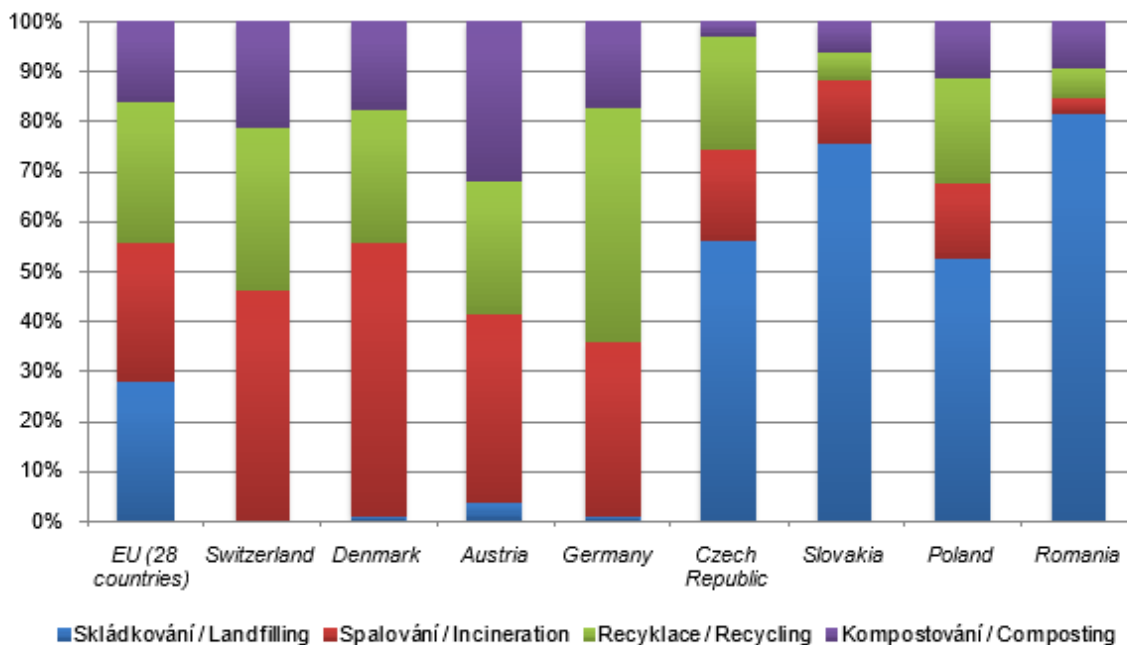
Smyslem této práce je shrnout stav odpadového hospodářství v ČR a v jeho kontextu uvést možnosti energetického využití odpadů. Kromě popisu již existujících platforem pro výstavbu zařízení, která odpad energeticky využívají, se práce bude zabývat problémem ekonomického chodu takového zařízení a nakonec představí i nástroje, které lze použít pro optimalizaci projektu jeho výstavby.

1. VÝROBA TEPELNÉ ENERGIE Z KOMUNÁLNÍHO ODPADU

1.1. Výhody spalování komunálního odpadu

Odpad je nedílnou součástí současné společnosti a jeho produkce se s rozvojem konzumní společnosti neustále zvyšuje. Zatímco v roce 2012 bylo v ČR vyprodukováno 2845077 t odpadu, v roce 2015 to již bylo 3337336 t [1]. Schopnost řídit nakládání s odpadem je tedy zcela klíčová a dobré odpadové hospodářství je považováno za jeden z pilířů takzvaného „trvale udržitelného rozvoje“ [2], což je ekonomický růst, který zatěžuje životní prostředí pouze v takové míře, ve které nedojde k jeho trvalému poškození, při zachování určitého životního standardu společnosti. Evropská unie, které je Česká republika členem, staví udržitelný rozvoj na přední místa svého zájmu. Prioritní způsoby zacházení s odpadem jsou pak dány přímo evropskou legislativou, popřípadě legislativou jednotlivých členských států. Více se způsobům zacházení s odpadem bude věnovat podkapitola 1.2.2 a to v části, která je věnována přímo předpisu, popisujícímu upřednostňované způsoby manipulace s odpadem.

Stav zacházení s odpadem v České republice rozhodně není ideální. Obecně se dá říci, že země bývalého východního bloku jsou na tom v zacházení s odpadem podstatně hůře, než zbytek EU, jak je demonstrováno na obrázku 1.1. Ve srovnání s evropským průměrem je



Zdroj: Eurostat

Source: Eurostat

Obrázek 1.1: Porovnání způsobů nakládání s odpadem ve vybraných zemích v roce 2014 [1]

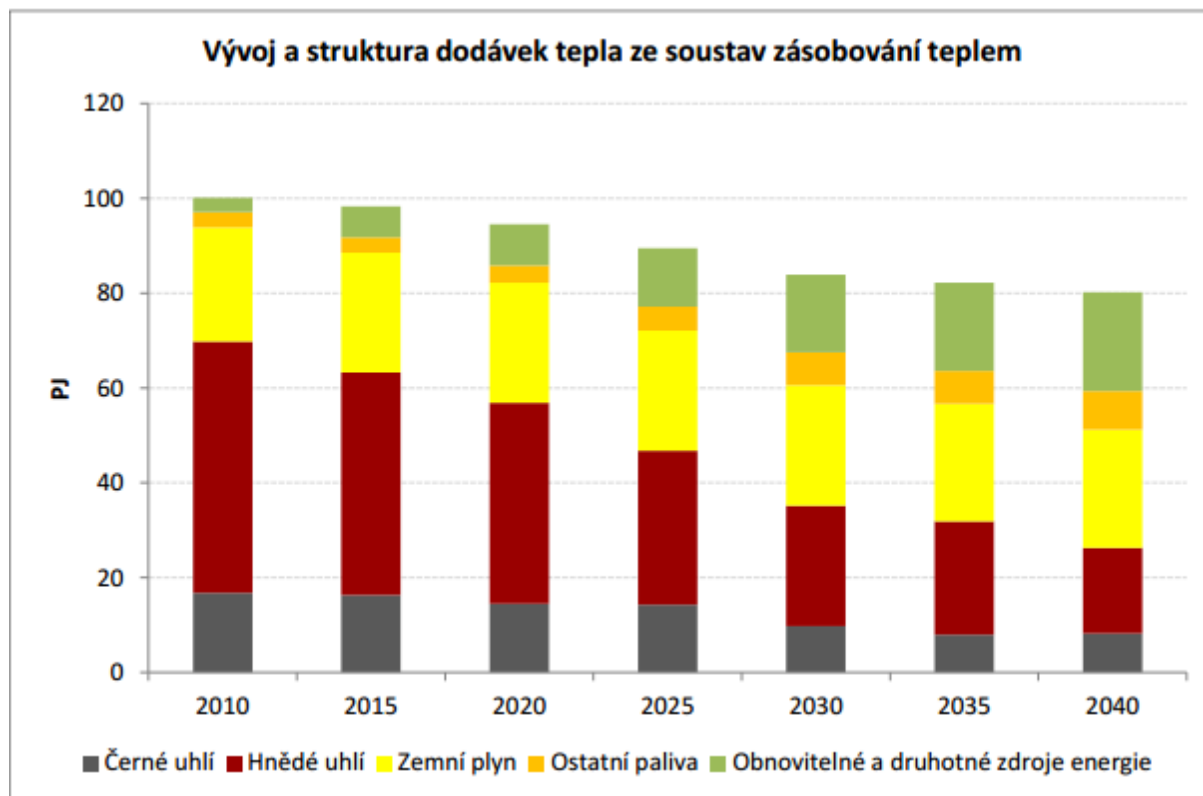
Česká republika příliš vysoce závislá na skládkování, které je však podle evropského zákona o odpadech [3] považováno za nejhorší možné zacházení s odpadem. Naše země se tedy zavázala k tomu, že od začátku roku 2024 úplně zakáže skládkování nezpracovaného odpadu [4]. Z toho vyplývá potřeba rozšířit síť zařízení, která odpad zpracovávají. To mohou být například

1.1. VÝHODY SPALOVÁNÍ KOMUNÁLNÍHO ODPADU

recyklační centra, díky kterým by se mělo dařit znovu využít materiál, který byl již jednou do výrobků vložený.

V ČR v současné době existují pouze tři ZEVO. první v Praze-Malešicích, které má roční kapacitu využitelného odpadu 310 kt [2]. Druhé zařízení o kapacitě 240 kt [2] se nachází v Brně. Třetí, poslední, zařízení se pak nachází v Liberci a jeho kapacita je 96 kt [2]. Vzhledem k množství ročně vyprodukovaného odpadu, o kterém bylo psáno v prvním odstavci, je patrné, že na trhu je stále místo pro stavbu nových zařízení.

Jak je uvedeno například v práci profesora Brunnera z Vídeňské technologické univerzity [5], není možné dosáhnout stoprocentního podílu recyklovatelného materiálu, například i z důvodu případné degradace druhotné suroviny. Pro EVO je velmi zajímavá část odpadu, nazývaná „komunální odpad“, dále jen KO, a především jeho část, která se již z libovolného důvodu nevyplatí třídít, nazývaná pojmem „směsný komunální odpad“, dále SKO. Jeho přesnější definice dle platné české legislativy je uvedena v podkapitole 1.2.1. I když se dá předpokládat, že se zvyšováním podílu recyklovaného odpadu se bude množství SKO snižovat, stále se, zejména z důvodu závazku k zákazu skládkování, vyplatí o odpadu uvažovat jako o surovině vhodné pro energetické využití. Právě energetické využití odpadu, dále jen EVO, představuje perspektivní strategii pro zpracování odpadu. Z příkladu členských zemí, které mají výrazně nižší podíl skládkovaného odpadu než ČR, je vidět, že snížení množství skládkovaného odpadu bylo docíleno nejen zvýšením podílu recyklace, ale také díky zvýšení podílu odpadu energeticky využívaného [6]. Jak je vidět z obrázku 1.1, Česká republika nejenom, že počítá se zvýšením podílu EVO, ale počítá i se zvýšením podílu tepelné energie, která bude pocházet z odpadu.



Obrázek 1.2: Předpokládaný vývoj dodávek tepla [7]

Hlavní výhodou energetického využití SKO je především to, že již dále nemusíme řešit jeho skládání, které se provádí skládkováním. Skládky představují zátěž pro životní prostředí na

1. VÝROBA TEPELNÉ ENERGIE Z KOMUNÁLNÍHO ODPADU

mnoha úrovních, jejichž popis však není smyslem této práce. Pro ilustraci se například jedná o uvolňování takzvaného *skládkového plynu*. Ten je složen především z metanu, což je skleníkový plyn. Spalováním KO lze podstatně snížit objem skládek a navíc výrazně ušetřit konvenční neobnovitelné zdroje, jako jsou různá fosilní paliva. Vedlejší produkty, vzniklé při EVO, lze i využít. Například škvára může být dále využívána jako stavební materiál, popřípadě se z ní dají dále získávat některé železné kovy. Stejně tak je z čištění spalin možné vytěžit nemalé množství zinku. [2]

Část SKO pak lze spálit buď jen velmi obtížně a tedy ekonomicky nerentabilně, a nebo prakticky vůbec. Jedná se zhruba o 25-30 % hmotnostního podílu a 90 % podílu objemového. Jak je zmíněno výše, tato část lze dále využít. V nejhorším případě, ke kterému může dojít v situaci, kdy není na trhu aktuálně po zbytkovém odpadu poptávka, pak tato část skončí přímo na skládce, avšak nemusíme se již potýkat se vznikem skládkového plynu, neboť škvára je, jakožto produkt tepelného zpracování, biologicky a chemicky stabilizovaná. Navíc, jak vyplývá z objemového podílu, alespoň výrazně snížíme velikost skládek. Obecně je však zbytečné většinu zbytkového odpadu skládkovat, s výjimkou popílku, zachyceného při čištění spalin, který je považován za nebezpečný odpad a v současné době pro něj není využití. Jedná se však pouze o cca 3 % z celkové vstupní hmotnosti odpadu. [2].

1.2. Energetické využití odpadu z hlediska české a evropské legislativy

Vzhledem k faktu, že je Česká republika členem Evropské unie, se naše legislativa do značné míry podřizuje právě té unijní. Následující řádky budou věnovány především vybraným českým právním předpisům, které podchycují EVO v legislativě, a také evropským směrnicím, kterými se Česká republika zavázala řídit.

1.2.1. Legislativní předpisy v ČR

Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů 185/2001 Sb. [4]

V České republice se odpadovému hospodářství věnuje především zákon o odpadu a o změně některých dalších zákonů 185/2001 Sb., který nejen přesně vymezuje pojem „odpad“, ale také, především v přílohách, definuje možné způsoby zacházení s odpadem, od skládkování po EVO. Dále pak zákon definuje poměrně širokou škálu pravidel, která s odpadem souvisí, namátkou podmínky pro zacházení s nebezpečným odpadem, pravidla pro vnitrostátní a mimostátní převoz odpadu, definice různých druhů odpadu, ale například i definuje způsob, jakým si samosprávná jednotka, většinou obec, může určit poplatek za svoz odpadu, který bude dále rozveden v podkapitole 3.1.1 věnované financování ZEVO. Tato podkapitola bude věnována zejména rozboru tohoto zákona a zdůraznění jeho částí, které jsou významné pro EVO.

Dle § 3 je odpad **každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl či povinnost se jí zbavit**. Zákon dále upřesňuje situace, ve kterých je osoba povinná se věci zbavit a tedy vytvořit odpad. Obecně se dá charakteristika odpadu shrnout tak, že se jedná o věc, která již nemá žádné další využití. Pokud existují pochybnosti o tom, zda je movitá věc odpadem, rozhoduje o jejím statusu příslušný krajský úřad. Podle odstavce 6 tohoto paragrafu také existuje řada způsobů, jakými může movitá věc status odpadu ztratit.

1.2. ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADU Z HLEDISKA ČESKÉ A EVROPSKÉ LEGISLATIVY

Zákon také definuje minimální energetickou účinnost, požadovanou pro legální zařízení EVO, také zvanou „Faktor R1“ či „účinnost R1“ (ve skutečnosti se nejedná o tradiční účinnost, protože může nabývat i hodnot ≥ 1). Požadavek na minimální účinnost je legislativně dán v příloze č. 12 v zákoně o odpadech takto:

- $\eta \geq 0,60$ „pro zařízení, která získala souhlas k provozu zařízení a byla provozována před 1. lednem 2009“
- $\eta \geq 0,65$ „pro zařízení, která získala souhlas k provozu po 31. prosinci 2008“

Ze zvyšujících se nároků je patrný i soulad s celkovou státní energetickou koncepcí, která počítá s tím, že se postupně budou vyvíjet lepší technologie, které vedou také ke zlepšování energetické využitelnosti odpadu, neboli k vyšší účinnosti. Samotná rovnice pro výpočet účinnosti je legislativně dána následovně:

$$\eta = (E_p - (E_f + E_i)) / (0,97 \cdot (E_w + E_f))$$

a kde význam jednotlivých členů je následující:

- E_p celkové množství vyrobené energie, ve formě tepla nebo elektřiny, přičemž každý příslušný druh energie je násoben určitým koeficientem [GJ/rok]
- E_f energie vstupující do systému z paliv, která přispívají k výrobě páry [GJ/rok]
- E_w energie celkově obsažené v odpadu [GJ/rok]
- E_i energie dodaná ke spotřebitelům [GJ/rok]
- 0,97 činitel energetických ztrát [GJ/rok]

Vyhláška o Katalogu odpadů 93/2016 Sb. [4]

Složení odpadu je komplexní a je dáno především charakterem producenta odpadu. Je logické, že například nemocnice, kovovýroba nebo běžná domácnost budou produkovat, alespoň co se složení týká, jiné druhy odpadů. Zařazením a kategorizací odpadu se zabývá vyhláška Ministerstva životního prostředí o Katalogu odpadů. V příloze této vyhlášky je odpad dělen na dvacet různých kategorií, z nichž každá má několik dalších podkategorií. Dle § 4 příslušné vyhlášky se odpad zařazuje a následně identifikuje podle šestimístního katalogového čísla „v němž první dvojčíslí označuje skupinu odpadů, druhé dvojčíslí podskupinu odpadů a třetí dvojčíslí druh odpadu“. Z hlediska EVO je pak nejdůležitější skupina 20 komunální odpad. Vyhláška uvádí pro KO tyto 3 hlavní kategorie:

1. Složky z odděleného sběru (kromě obalů, které jsou definovány v jiné skupině)
 - například papír a lepenka, sklo, oděvy, ale například i některé nebezpečné odpady, jako kyseliny, zásady či fotochemikálie
2. Odpady ze zahrad a parků (včetně hřbitovního odpadu)
 - například biologicky rozložený odpad nebo zemina a kameny
3. Ostatní komunální odpady
 - sem patří SKO, odpad z tržišť nebo kaly ze septiků a žump, objemný odpad a další

Zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. [8]

Zákon definuje pojem **stacionární zdroj** jako „ucelená technicky dále nedělitelná stacionární technická jednotka nebo činnost, které znečišťují nebo by mohly znečišťovat, nejde-li o stacionární technickou jednotku používanou pouze k výzkumu, vývoji nebo zkoušení nových výrobků a procesů.“ Dále pak zákon určuje, pro které stacionární zdroje se provádí příslušný druh měření emisí. Pro zdroje s EVO je to dle přílohy č. 4 kontinuální měření.

Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování 415/2012 Sb. [9]

Aby mohlo zařízení odpad energeticky využívat a ne jej pouze spalovat, musí splňovat kritéria dané tímto zákonem. Tato pravidla se týkají především ekologické zátěže, respektive emisních limitů pro látky znečišťující ovzduší, a požadované energetické účinnosti. Měření emisí se dle zákona provádí v místě, kde se již nemění složení plynu, vypouštěného do ovzduší, a provádí ho pouze autorizovaná osoba. Jak plyne ze zákona o ochraně ovzduší [8], měření emisí se pro spalovny odpadu provádí kontinuálně. Výjimkou je pak situace, kdy je provozovatel spalovny schopen prokázat, že emisní limity nebudou překračovány - pak by mohlo být měření prováděno jednorázově, což provozovateli pravděpodobně ušetří náklady. V tabulce 1.1 jsou pro porovnání uvedeny vybrané specifické denní emisní limity pro spalování různých druhů paliv včetně odpadu, měřené při tlaku 101,325 kPa, teplotě 273,15 K a referenčním obsahu kyslíku ve spalinách 11 %. Hodnoty jsou platné pro malé a střední zdroje znečišťování s výkonem do 50 MW.

| Znečišťující látka | Spalovna odpadu [mg/m^3] | Kotle na hnědé uhlí [mg/m^3] | Kotle na dřevo [mg/m^3] | Plynové kotle [mg/m^3] |
|--------------------|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| TZL | 10 | 100 | 250 | 28 |
| SO_2 | 50 | 1667 | 2500 | 19 |
| NO_x | 200 | 435 | 650 | 111 |
| CO | 50 | 267 | 650 | 55 |

Tabulka 1.1: Srovnání emisních limitů pro kotle na různá paliva

1.2.2. Legislativní předpisy v EU

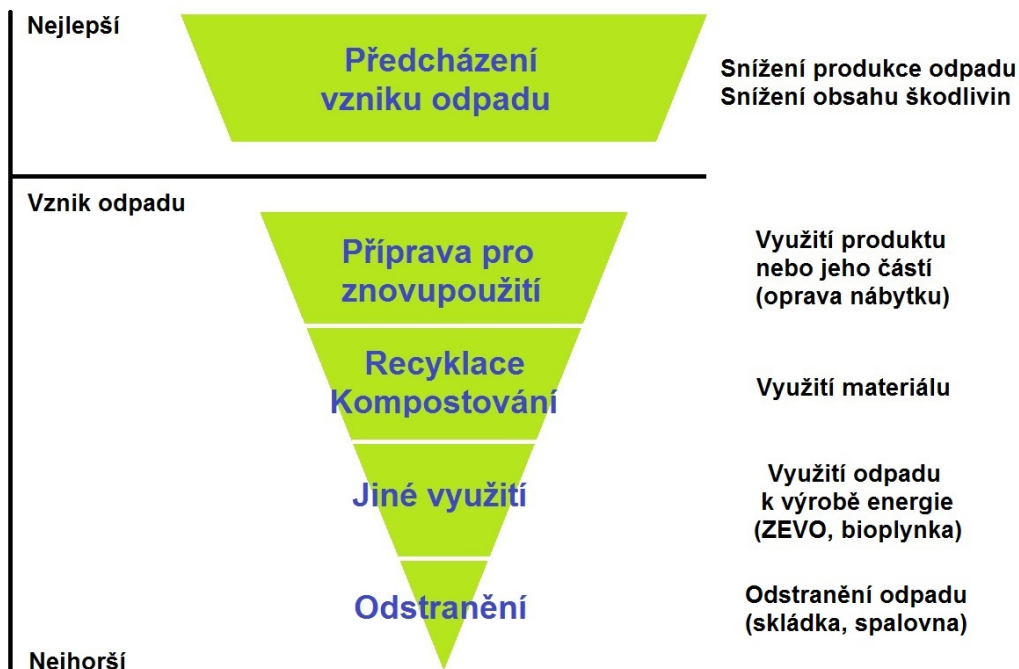
V současné době podléhají zákony ČR v oblasti odpadového hospodářství jednotným evropským směrnicím. V následující podkapitole jsou tedy jen stručně představeny příslušné směrnice, neboť jejich obsah byl zprostředkován již v předchozí podkapitole č 1.2.1.

Směrnice 2008/98/ES o odpadech a zrušení některých směrnic [3]

Tato směrnice definuje pojem odpad, a dále se snaží odpad kategorizovat dle složení. Následně pak legislativně ukotvuje priority EU v oblasti odpadového hospodářství, zejména v kontextu recyklace a snahy omezit skládkování. V rámci české legislativy odpovídají této směrnici zákony [4] a [10]. Preferovaná hierarchie nakládání s odpady je zobrazena v pyramidovém grafu na obrázku 1.2.2. Na něm jsou názorně ukázány upřednostňované způsoby zacházení s odpadem. Jednoduše řečeno, největší důraz by měl být kladen na to, aby odpad vlastně vůbec nevznikal, dále by se pak jeho co největší množství mělo buď znovu použít nebo recyklovat, a jen ta část, u

1.2. ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADU Z HLEDISKA ČESKÉ A EVROPSKÉ LEGISLATIVY

kteřé to nebude možné, by měla být využita jiným způsobem, například energeticky, popřípadě skládkována. Směrnice tuto hierarchii stanovuje a taktěž příkazuje členským státům, aby udělaly maximum pro to, aby se na hierarchicky nižší úrovň dostávalo co nejméně odpadu.



Obrázek 1.3: Hierarchie nakládání s odpady [11]

Nařizení evropského parlamentu 1013/2006 o přepravě odpadů [12]

Upravuje podmínky pro přepravu odpadů mezi jednotlivými státy evropské unie. Jde především o stanovení jasných limitů v oblasti ekologické zátěže, která vzniká při činnosti spojené s přepravou odpadů.

Směrnice 2010/75/EU o průmyslových emisích [13]

Směrnice definuje obecná pravidla pro stávající i nově vznikající průmyslové objekty členských států unie v oblasti znečišťování okolí.

Směrnice 2000/76/ES o spalování odpadů [14]

Samostatná směrnice věnovaná unijním pravidlům pro spalování odpadu. Z této směrnice vychází emisní limity, integrované do české legislativy v zákoně [9]. Jsou zde stanoveny především podmínky, které musí ZEVO splňovat, aby mohlo dostat povolení k činnosti. Z faktu, že je spalování odpadu věnována celá vlastní obsáhlá směrnice lze také soudit, že pro EU je podpora zvýšení podílu spalovaného odpadu prioritou, pravděpodobně především z důvodu zachování trvale udržitelného rozvoje.

1.3. Technologie výroby tepla

Tato podkapitola je věnována zejména obecné charakteristice výtopen, respektive tepláren, vyzdvižení výhod kogenerace a také stručnému popisu technologií, spojených přímo s EVO.

1.3.1. Obecný popis centrály pro výrobu tepla

Tepelná energie je vyráběna v zařízeních, známých jako výtopy. U klasické výtopy je palivo spalováno v kotelně, čímž se chemickou reakcí uvolňuje tepelná energie, která je poté předávána nosnému médiu, nejčastěji vodě. Teplo je dále dopravováno ke spotřebiteli buď ve formě horké vody, nebo přehřáté vodní páry. U centrály vyrábějící tepelnou energii je jedním z nejdůležitějších konstrukčních parametrů výběr optimálního řešení pro spalování příslušného paliva a kvůli legislativním požadavkům, uvedeným v podkapitole 1.2 i filtrace vedlejších produktů spalování, takzvaných spalin. [15]

1.3.2. Kogenerace a pojem teplárna

Samotná výroba tepla je často nevhodná, a v praxi tedy existují spíše zařízení, která kromě energie tepelné vyrábějí i energii elektrickou, nazývané teplárny. Teplárnami rozumíme především taková zařízení, jež vyrábějí velké množství energie, kterou pak dodávají do sítě centrálního zásobování teplem, dále CZT. Společná výroba tepelné a elektrické energie je dnes většinou nazývána buď jako „kogenerace“ nebo kombinovaná výroba elektřiny a tepla (zkráceně KVET) a v anglické literatuře pak jako CHP, neboli Combined Heat and Power. CHP s sebou nese řadu výhod, ale i některé nevýhody.[7]

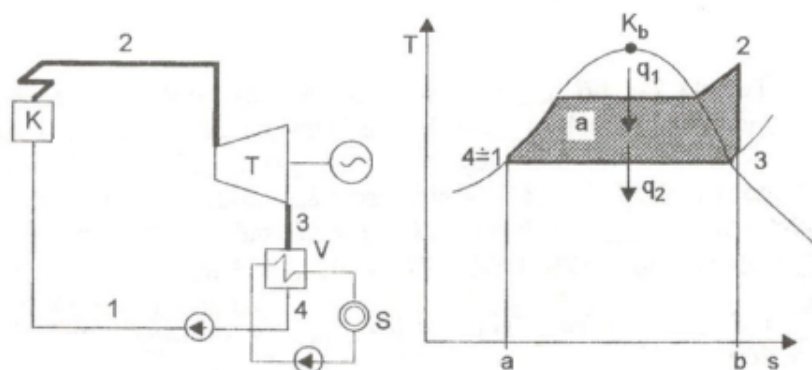
Hlavním kladem kogenerační výroby energie je především obecná úspora energie. Pro výrobu elektrické energie v teplárně jsou nejčastěji používány buď parní protitlakové (PT), kondenzační odběrové (KOT) a nebo plynové turbíny. Parní turbíny jsou roztáčeny přehřátou vodní párou, naproti tomu plynové turbíny jsou roztáčeny přímo pomocí spalin, které mají vysokou teplotu. V praxi se pak dále často uplatňují takzvané paroplynové energetické jednotky, které mají dva cykly, jeden s plynovou a druhý s parní turbínou. Pro výrobu elektřiny v menším měřítku lze použít i spalovací motory. Řešení pomocí parní nebo paroplynové turbíny však nelze pro EVO aplikovat, neboť spalujeme pevné palivo. V případě ZEVO tedy uvažujeme PT nebo KOT. Všechna výše uvedená zařízení slouží ke stejnému účelu: dodávanou tepelnou energii, vytvořenou pomocí spalování paliva (v našem případě odpadu), přeměňují na energii mechanickou, která je poté předávána rotoru generátoru, který ji dále přetváří na energii elektrickou. Všechna zařízení pracují na principu termodynamických cyklů, ať už pracovního plynu (spalin), nebo vodní páry. Výhodu kogeneračních zařízení lze dobře demonstrovat na příkladu centrály s PT, u níž uvažujeme chod v ideálním Clausius-Rankinově tepelném cyklu, a která je zobrazena na obrázku 1.4.

Pravá část obrázku znázorňuje Rankine-Clausiusův cyklus v T-s diagramu. Z 2. termodynamického zákona plyne, [16] že:

$$q = T \cdot s \quad (1.1)$$

kde q je teplo [J], T termodynamická teplota [K] a s měrná entropie [$J/K \cdot kg$]. Plochy pod křivkami v T-s diagramu tedy znázorňují teplo, konkrétně pak plocha obrazce mezi body a-4-1-2-3-b-a znázorňuje teplo dodané (kotle) a plocha mezi body a-4-3-b-a představuje teplo odebrané (chladičem do okolí). Právě odváděné teplo je v kogenerační jednotce

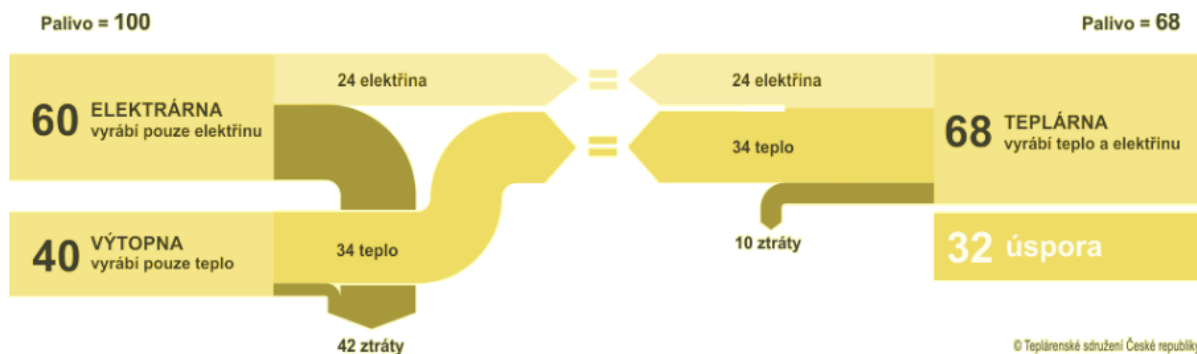
1.3. TECHNOLOGIE VÝROBY TEPLA



Obrázek 1.4: Schéma teplárny s kondenzační turbínou [15]

využito místo odevzdání do okolí pomocí chladicí věže (tedy místo tzv. maření tepla). Výroba tepla při KVET bývá často doprovodným jevem a zavádí se především pro další využití tepla, vyprodukovaného primárně pro výrobu elektřiny.[15] [16]

Na schématu zapojení, znázorněném na obrázku 1.4, je naznačeno, že teplo je odváděno do sítě centrálního zásobování teplem ve formě horké vody. Pára, odvedená od turbíny, kondenzuje ve výměníku, a tím dále předává teplo vodě, která jej vede ke spotřebiteli. Kvůli nižším tepelným ztrátám [15] je v současné době způsob dodávky tepla ve formě vody preferovaný oproti dodávce ve formě páry, čemuž se detailněji věnuje kapitola 2.1.2. V standardní síti je nutné mít nejméně dvojí potrubí, jedno pro dopravu horké a druhé pro dopravu studené vody. Stejně tak je, zvláště u větších sítí, potřeba vybudovat prvky, které zajistí stálý průtok média potrubím. Druhou možností je pak doprava tepla ve formě přehřáté páry. Tato možnost výrazně zvýhodňuje výrobu tepla na úkor elektřiny, neboť musíme zpravidla z turbíny odebrat páru před využitím celého jejího potenciálu pro přeměnu na mechanickou energii. [15][17] Kvůli vyšším ztrátám není tento způsob dopravy preferovaný, volí se obvykle v případech, kdy existuje v dané lokalitě velká poptávka po páře (například jako vstupní surovině pro průmyslovou výrobu). Výhody v podobě energetických úspor KVET oproti oddělené výrobě elektřiny a tepla jsou znázorněny na obrázku 1.5. Na tomto obrázku je zjednodušeně zobrazeno srovnání náročnosti výroby



Obrázek 1.5: Srovnání kombinované a oddělené výroby tepla a elektřiny [18]

konečných produktů (tedy elektřiny a tepla) při KVET a oddělené výrobě. Pro výrobu 24 jednotek elektrické energie a 34 jednotek tepla budeme při oddělené výrobě potřebovat 100 jednotek vstupní suroviny. Pro stejné množství výchozích produktů, vyrobených KVET, však budeme potřebovat pouze 68 jednotek vstupní suroviny, což je o 32 méně, než u oddělené výroby. Dochází tedy až ke třetinové úspoře vstupních surovin.

1. VÝROBA TEPELNÉ ENERGIE Z KOMUNÁLNÍHO ODPADU

Hlavním záporům kogenerace jsou především zvýšené konstrukční nároky. V síti je nutné mít prvek, který bude řídit odvod tepla na základě poptávky buď do sítě centrálního zásobování, nebo do ovzduší. KVET by se však dala obecně označit za strategii, která má daleko více výhod, než záporů. Obvykle je v teplárenském centru preferována výroba elektrické energie, a kogenerační strategie nám umožňuje dále zužítkovat jinak odpadové teplo.[15]

1.3.3. Výroba tepla z odpadu

Výroba tepla z odpadu se v obecných principech příliš neliší od jeho výroby z konvenčních paliv. Hlavní specifika vyplývají z využití jiného druhu paliva. To se projevuje především jinými nároky na příjem paliva, jeho spalování a čištění spalin.

Příjem a spalování

Na rozdíl od konvenčních paliv využívaných v teplárenství jako je uhlí nebo i biomasa, je odpad při vstupu do spalovny značně nehomogenní surovina. Předtím, než se odpad energeticky využije, je tedy nutné rozbít některé jeho objemné části na menší. Dále je potřeba odpad „homogenizovat“, tedy promíchat tak, aby se co nejvíce blížil jednodušší struktuře, a byla tedy zaručena jeho stabilní výhřevnost (složením a výhřevností odpadu se ve stručné formě věnuje podkapitola 1.4. [2])

Homogenizovaný odpad může být dále zpracováván a spalován v ohništi, které je umístěno pod kotlem. V dnešní době se pro spalování odpadů nejčastěji využívají roštová ohniště, konkrétně jsou pak nejobvyklejší pásové varianty. Odpad je nasypán na rošt ze zásobníku a postupně na pohyblivém pásu projíždí několika fázemi spalování, přičemž teplota v ohništi dosahuje 850-1100 °C. Dle platné české legislativy [9] pak musí být vzniklé spaliny ohřáty nejméně na 2 sekundy na teplotu 850 °C, aby se docílilo zániku případných škodlivých organických složek. KO je dostatečně výhřevný a je schopen hořet sám, pouze při nastartování kotle je nutné přidávat i sekundární palivo, nejčastěji zemní plyn. Vyhořelé palivo je z ohniště shazováno, vyhořelé části pak mohou být buď zaskládkovány a nebo dále využity, například z nich může být pomocí elektromagnetu vyseparováno železo. [2] [19]

Kvůli charakteristickému složení odpadu také není možné vyrábět v ZEVO páru o takových parametrech, jako v konvenční teplárně. Důvodem je zejména vznik tzv. „chlorové koroze“ při vysokých teplotách spalin, způsobený obsahem chlóru v palivu [2]. Z tohoto důvodu bývá pára v ZEVO obvykle připravována pouze na teplotu okolo 400 °C a tlaku okolo 4 MPa. Plyne z toho i jiné řazení jednotlivých prvků kotle.

Čištění spalin

Čištění výstupních produktů je velmi důležitou součástí procesu EVO. Z důvodu různorodého chemického složení odpadu a jeho značné nehomogenity je nutné použít pokročilé čistící systémy spalin (druhotných produktů, vzniklých při EVO), aby byly splněny všechny legislativou dané emisní limity, uvedené v podkapitole 1.2.1. Jedná se o komplexní vícestupňový proces, typicky složený z těchto částí:[2]

- **Redukce oxidů dusíku** probíhá buď v katalyzátoru, nebo pomocí vstříkávání roztoku NH_3 nebo močoviny do prostoru nad ohništěm
- **Katalytický rozklad dioxinů a furanů** probíhající v katalyzátorech

1.4. SLOŽENÍ A VÝHŘEVNOST ODPADU

- **Zachycení popílku** je často realizováno pomocí elektrostatického filtru, kdy jsou prachové částice nejprve zelektrizovány a následně zachyceny

Konkrétní podoba procesu spalín závisí na použitých technologiích při stavbě ZEVO. Jedná se o komplikovaný problém, kterému se tato práce nebude do hloubky věnovat.

1.4. Složení a výhřevnost odpadu

Složení KO je proměnné a závislé na několika vstupních faktorech. Prvním a nejdůležitějším je charakter místa původu odpadu, zejména pokud se jedná o odpad z domácností. Složení odpadu z vesnice bude odlišné od toho z velkých měst. V následující tabulce je uvedeno hmotnostní zastoupení některých složek odpadu v závislosti na původu v roce 2003: Zbytek odpadu tvoří

| Složka | Hmotnostní podíl složek [%] | | |
|----------------|-----------------------------|---------------------|---------|
| | Sídliště velké město | Sídliště malé město | Vesnice |
| Papír, lepenka | 22,7 | 22,2 | 7,6 |
| Plasty | 13,8 | 16,8 | 9,0 |
| Sklo | 8,7 | 6,7 | 8,9 |
| Kovy | 3,4 | 3,0 | 4,5 |
| Bioodpad | 18,2 | 19,6 | 6,3 |

Tabulka 1.2: Srovnání podílu vybraných složek odpadu [20]

nespecifikované ostatní složky. Z tabulky jsou patrné rozdíly v obsahu jednotlivých frakcí v závislosti na místě původu, dalším faktorem je však i roční období. Například produkce bioodpadu bude pravděpodobně, zvláště na vesnicích, větší v létě, než v zimě. Z hlediska EVO je pak nejdůležitější složkou SKO a v menší míře objemný odpad [21]. O výhřevnosti, tedy energetické využitelnosti odpadu, můžeme mluvit jen v rámci určité tolerance. Nejčastěji se udává hodnota mezi 7,5 MJ/kg až 10,5 MJ/kg. [22]

2. CENTRÁLNÍ ZÁSOBOVÁNÍ TEPEM

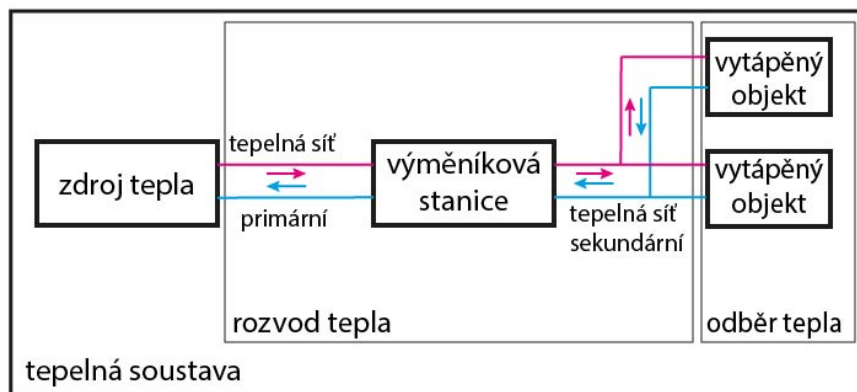
Dodávky tepelné energie ke spotřebitelům jsou typicky realizovány za pomoci nějaké tepelné sítě. Taková síť může být pouze lokální a vést teplo například od plynové kotle, umístěného ve sklepení budovy, do radiátorů umístěných v jednotlivých místnostech. Může být však i větší a vést teplo k několika spotřebitelům najednou od jednoho nebo více různých zdrojů. Právě v tomto případě hovoříme o takzvaném „centrálním zásobování teplem“, nebo také „dálkovém vytápění“. V této části kapitoly bude nejprve stručně vysvětlen princip fungování sítí CZT (dále jen SCZT), následně bude představen stav těchto sítí, zejména v oblasti rozšíření, a také bude stav českých teplárenských sítí uveden v evropském kontextu. Nakonec se bude kapitola věnovat zdrojům, ze kterých může pocházet teplo, dodávané do CZT a stručně nastíní, jak do této problematiky spadají ZEVO.

2.1. Technologie dálkového vytápění

Soustava centralizovaného, či dálkového zásobování teplem je souborem vzájemně propojených zařízení, která slouží k rozvodu a dodávce tepla, které pochází ze samostatných zdrojů [17]. Hlavním předmětem zájmu v těchto sítích je teplotně médium, kterým bývá zpravidla horká voda, nebo pára. Právě druh teplotně média je jedním z hlavních kritérií, podle kterých dělíme tepelné sítě na:

- **Parní**, které nesou teplo od primárních zdrojů ke spotřebiteli ve formě skupenského tepla, nepřilíš časté
- **Vodní**, které se dále dělí na teplovodní a horkovodní, na základě toho, zda teplota média překročí 110 °C. Jedná se o nejčastěji využívaný typ SCZT.

Základní podoba sítě je stejná pro oba dva hlavní druhy teplotně média a je zobrazena na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Schéma jednoduché sítě centralizovaného zásobování teplem [23]

Před tím, než může být teplo rozvedeno ke spotřebitelům, musí být nejprve vyprodukováno ve zdroji, nejčastěji spalováním určitého druhu paliva, a předáno médiu. To je následně vedeno primárním potrubím buď přímo ke spotřebiteli anebo, ve většině případů, do výměňkových stanic, které dále upravují teplo tak, aby odpovídalo přáním spotřebitele. K samostatným spotřebitelům je pak vedeno sekundárním potrubím. Počet potrubí odpovídá konstrukčnímu řešení

2.1. TECHNOLOGIE DÁLKOVÉHO VYTÁPĚNÍ

sítě. U moderních sítí je běžné, že mají v primární části pouze 2 potrubí, jedno vede ohřáté médium do výměňkových stanic a druhé vede z výměňkových stanic ochlazené médium, které již předalo své teplo, zpět ke zdrojům, kde může být znovu ohřáto a vráceno do cyklu primárním potrubím. Dále budou blíže představeny jednotlivé komponenty tepelných sítí. [24][17]

2.1.1. Zdroje dodávek tepla v rámci CZT

Klíčovým faktorem, který musíme vzít v úvahu v souvislosti se zdroji, dodávajícími teplo do centralizované sítě, je především roční poptávka po teple. Ta má velmi proměnný charakter, závislý nejen na ročním období, ale také na aktuálním počasí či výkyvech ve výrobcích, závislých na dodávkách tepla z CZT. Tomuto problému, který zároveň představuje i jednu z nejdůležitějších věcí, které je potřeba zvažovat při výstavbě nového teplotrenského zařízení, včetně ZEVO, se detailněji věnuje podkapitola 2.4. Prozatím postačí uvést, že poptávka po teple se může skokově zvýšit i snížit v řádech hodin a zdroje, napojené na tepelnou síť, musí být schopné na tyto změny reagovat. Zdroje tepla by se tedy daly rozdělit na dvě části, dle toho, jakým způsobem přispívají k pokrytí proměnné poptávky [24]:

- **Stálé zdroje**
- **Doplňkové zdroje**

Stálé zdroje

Jsou stále v provozu, jak ostatně vyplývá z názvu. U těchto zdrojů je zapotřebí, aby byly schopny dodávat určité konstantní množství tepla. Zpravidla mají delší náběh a jejich pravidelná odstávka by tedy byla neekonomická [24]. Nejlepšími zdroji jsou pak teplárny, o kterých bylo psáno již v podkapitole 1.3.2. Může se jednat například o zařízení spalující zemní plyn nebo hnědé uhlí, které vyrábí elektřinu a zbytkové teplo dodává do sítě místo toho, aby ho vypustilo do ovzduší. Vzhledem k neustálé poptávce po elektřině navíc budou vždy moci dodávat elektrickou energii a tedy i v případě, že by musely, například kvůli extrémně teplým dnům v průběhu topné sezony, vypouštět teplo do ovzduší, stále budou ekonomické. Tyto zdroje obvykle procházejí jednou ročně, zpravidla v letních měsících, plánovanou odstávkou. Důvodem je provedení údržby v době, kdy není tak velká poptávka po tepelné energii, ale stále je znatelná poptávka po elektřině. To otevírá značné možnosti pro ZEVO, které je také možným stálým zdrojem. Z důvodu jeho prakticky neustálého provozu, vysvětleného dále v kapitole 3.1, může přispět k prodloužení odstávky konvenčních tepláren a tedy k jejich najetí až v době, kdy budou ekonomicky rentabilní.

Doplňkové zdroje

Také se o nich někdy hovoří jako o špičkových zdrojích, neboť pomáhají překlenovat špičky v poptávce po teple. Vyrábí se v nich pouze teplo a nepředstavují tedy tak hospodárnou investici, jako stálé zdroje. Pracují pouze s malým ročním využitím instalovaného výkonu, jsou tedy v provozu jen v době, kdy je potřeba pokrýt zvýšenou poptávku. Obvykle se jedná o zařízení s rychlým náběhem, například spalujícím zemní plyn[24][17].

V případě integrace ZEVO do provozu již zavedené teplárny pak můžeme za špičkový zdroj považovat i stávající kotel, který spaluje například HU. To s sebou přináší další problém pro pokrytí špiček, neboť takový zdroj musí najet za určitý časový úsek, například z důvodu nákladnosti náběhu. Vliv takového špičkového zdroje na optimalizaci požadovaného výkonu ZEVO je blíže přiblížen v kapitole 4.

2.1.2. Primární rozvody tepla

Teplonosné médium je vedeno v primárním a sekundárním okruhu potrubím, které je obvykle vyrobeno z oceli nebo mědi. [24]. U teplovodných sítí, nebo v kondenzační větvi parních sítí, může být vyrobeno i z polymerů, například polybutenu nebo polypropylenu. Při návrhu těchto potrubí je důležité počítat zejména s relativně velkou teplotou přenášeného média, které dosahuje v horkovodných sítích i teploty 200 °C a tlakem, kterým může přesáhnout i hodnotu 1,5 MPa. Ta má za následek mimo jiné i teplotní roztažnost materiálů, ze kterých je potrubí vyrobeno. Teplotní roztažnost je popsána vztahem:

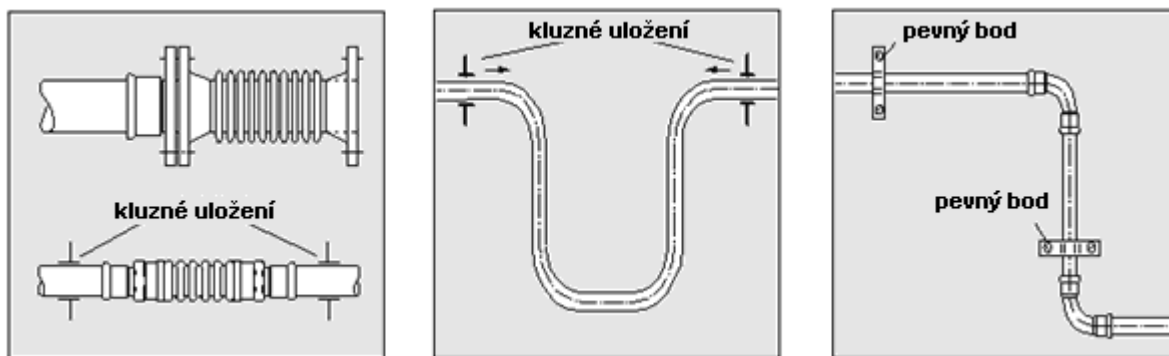
$$\delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \delta T \quad (2.1)$$

kde členy rovnice představují:

- δl ... změnu délky [m]
- l_0 ... původní délku [m]
- α ... koeficient teplotní roztažnosti [1/K]
- δT ... změnu termodynamické teploty [K]

Hodnota koeficientu teplotní roztažnosti [24] je pro ocel přibližně $12 \cdot 10^{-6}$ pro měď pak $16.5 \cdot 10^{-6}$. Pro představu, pokud budeme počítat se změnou teploty teplonosného média při náběhu teplárny z 20°C na 90°C (hodnoty pouze ilustrační) a budeme uvažovat ocelové potrubí o délce 1 km, dojdeme po dosazení do rovnice 2.1 k délkovému protažení potrubí o 0,84 m.

Zejména u primárních sítí (kvůli délce a vyššímu teplotnímu rozdílu) se tedy používají různé potrubní kompenzátory, pomocí kterých se celková délka potrubí dělí na takzvané „kompenzační úseky“, a které mají za cíl usměrnit teplotní dilataci, jinými slovy mají zajistit, aby se potrubí deformovalo v místech, která jsou tomu konstrukčně uzpůsobená. Na obrázku 2.2 jsou schématicky zobrazeny nejčastěji používané druhy kompenzátorů, zleva osový, U-kompenzátor a ohybový.



Obrázek 2.2: Potrubní kompenzátory, zleva **osový**, **U-kompenzátor** a **ohybový** [25]

Při vedení tepla v potrubí dochází kromě teplotní dilatace taktéž ke znatelným tepelným ztrátám, proto bývá potrubí zpravidla izolované. Mezi často používané izolační hmoty patří například skelná vata, pórobeton a nebo různé pěny umělých hmot, například polyuretanu. Jako součásti izolační hmoty může být ale použit například i popílek, vzniklý mimo jiné při spalování odpadu. Izolační vrstva tvoří také nezanedbatelnou část nákladů na výstavbu sítě CZT, její tloušťka tedy bývá i jedním z předmětů optimalizace. Výpočet tepelných ztrát při přenosu představuje relativně komplexní problematiku, které se detailněji věnuje například tato [26] bakalářská práce, vypracovaná na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně.

2.1. TECHNOLOGIE DÁLKOVÉHO VYTÁPĚNÍ

Vedení samotných potrubí může být realizováno buď nadzemní a nebo podzemní cestou. Nadzemní řešení je méně nákladné, neboť je technicky snadnější na realizaci. Na rozdíl od podzemního řešení však viditelně zabírá místo a nepůsobí ani příliš esteticky. Je tedy voleno především v místech s řídkou zástavbou, typicky v okrajových částech měst (např. Brno-Maloměřice), nebo průmyslových areálech. V místech, kde je potřeba nadzemní prostor využívat k jiným účelům, je potom zpravidla voleno vedení potrubí pod zemí, ať již volně uložené přímo v zemině, v technickém kanálu anebo například v průchozí technické chodbě, takzvaném kolektoru. V následující části práce budou shrnuty základní charakteristiky parních a vodních sítí.

Parní síť

Jak vyplývá z názvu, teplonosným médiem je v případě těchto sítí nasycená vodní pára. Dle tlaku v potrubí se dělí na podtlakové, nízkotlaké a středotlaké. Jedná se o starší systémy, mezi jejichž největší výhody patří malá tepelná setrvačnost, tedy rychlý náběh a možnost přerušit provoz bez hrozby zamrznutí. Další výhodou je možnost vést ke spotřebiteli přímo páru, což je vhodné zejména u průmyslových výroby, které potřebují páru jako vstupní surovinu. Nevýhodou je pak obtížná regulace výkonu, vysoká povrchová teplota a v neposlední řadě nižší životnost v důsledku větší pravděpodobnosti vzniku koroze, díky agresivnímu médiu. [27]

Teplu je přenášeno především ve formě skupenského tepla, které je odběrateli předáno v kondenzátoru, a zpět ke zdroji je vraceno sekundárním potrubím (které nebývá izolované a obvykle má třetinový průměr, ve srovnání s parním potrubím) již v kapalném skupenství, obvykle při teplotě okolo 70°C. U spotřebitele je smyčka potrubí přerušena, sytá pára kondenzuje ve spotřebiči tepla, a následně stéká do kondenzačního potrubí. Kondenzační potrubí má menší průměr, než potrubí parní, zpravidla však bývají vedeny vedle sebe.

Na základě potřebného tepelného příkonu je potrubí těchto sítí navrhováno tak, aby dokázalo přenést potřebné množství média za časovou jednotku. Vztah mezi potřebným hmotnostním tokem a požadovaným příkonem je dán vztahem:[24]

$$P_t = G \cdot (i_{vstupn} - i_{vstupn}) \quad (2.2)$$

kde členy rovnice představují:

P_t ... požadovaný příkon [kJ]

G ... hmotnostní tok [kg/sec]

i ... měrné entalpie vstupní páry a výstupního kondenzátu [kJ/kg]

Rozdíl entalpií mezi přehřátou párou (o tlaku 0,2-1,5 MPa) a tekutým kondenzátem o teplotě 70°C je přibližně 2467 kJ/kg. Vzhledem k tomu, že rozdíl entalpií se dá považovat téměř za konstantní, jedinou možností regulace přenášeného výkonu je změna hmotnostního toku, což vede k výraznému zvýšení provozních nákladů. [24]

Dalším specifickým při konstrukci parních tepelných sítí je pak vznik kondenzátu přímo na stěnách parního potrubí. To představuje značný problém, zejména kvůli snížení užitečného průměru potrubí, tedy prostoru, kterým může protékat pára. Kondenzát je tedy nutné odvádět, čehož bývá docíleno za použití odvodných soustav. Ty jsou umístěny obvykle v určitých pravidelných intervalech. Vzhledem k tomu, že kondenzát vzniklý přímo v parním potrubí, má podobnou teplotu jako okolní pára, musí často projít ještě chladicí soustavou, než může být vložen do kondenzačního potrubí. [28][24]

Vodní síť

Na základě teploty teploty teploty se dělí na teplovodní a horkovodní, přičemž hraniční teplotou je 110°C. Hlavní výhodou těchto sítí je snadnější regulace. Velkou výhodou teplovodních sítí, které vedou vodu ohřátou „pouze“ na například 90°C je pak to, že mezi sekundárním a primárním potrubím nemusí být výměňková stanice. To znamená, že u jednodušších sítí může jít teplá voda připravená ve zdroji rovnou k odběrateli, čímž se šetří provozní náklady. Nevýhodou je pak pomalejší náběh sítí. Vodní sítě jsou modernější a jsou dnes všeobecně považovány za preferovanou variantu.

Typická vodní síť je tvořena, stejně jako parní síť, přívodním a odvodním potrubím. V horkovodních sítích je v přívodní větvi obvykle vedena voda o teplotě v rozmezí 150°C-200°C [24], v odvodním potrubí pak zpravidla voda o teplotě nižší než 70°C (pouze v SCZT napojených na teplárny, v okrskových sítích či průmyslových výtopenách může být požadována teplota naopak vyšší než 70°C [29]). Na rozdíl od parní sítě, kde každé potrubí vede médium v jiném skupenství (plynná pára, kapalný kondenzát), v případě vodního potrubí vede jak přívod, tak odvod médium ve skupenství kapalném. Vizualně se pak od parního odlišují tím, že obě potrubí mají stejný jmenovitý průměr, jsou obě izolována a navíc spolu tvoří uzavřený okruh. Pomocí podpůrného systému čerpadel je voda cirkulována od zdroje, ve kterém je jí předáno teplo, až do výměníku (může se jednat o výměník přímo u odběratele, například radiátor, anebo spotřebitelskou výměňkovou stanici). Ve výměníku předá teplo odběrateli a vrací se zpět ke zdroji. V ideálním případě, pokud nedochází k únikům média, je tedy neustále cirkulováno jedno stejné množství média.

Stejně jako v případě parních sítí, i u vodních sítí se dimenzují parametry potrubí na základě potřebného tepelného výkonu. Teplo je však přenášeno, na rozdíl od parních sítí, ve formě hmotnostního tepla, závislého na tepelné kapacitě média. Přenášený výkon lze vyjádřit takto: [24]

$$P_t = G \cdot c_w \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

kde členy rovnice představují:

$$\begin{aligned} P_t & \dots \text{požadovaný příkon [kJ]} \\ G & \dots \text{hmotnostní tok [kg/sec]} \\ c_w & \dots \text{měrnou tepelnou kapacitu teploty teploty média [kJ/(kg \cdot K)]} \\ \Delta T & \dots \text{rozdíl teplot v přívodním a vratném potrubí [K]} \end{aligned}$$

Měrná tepelná kapacita vody, jakožto teploty teploty média, je přibližně 4,18 J/(kg · K) [16], v detailnějších modelech je však potřeba počítat i s tím, že tepelná kapacita je ve skutečnosti funkcí teploty, a je tedy závislou proměnnou. Zvětšení tepelného výkonu pak lze provést dvěma způsoby. Prvním a nepříliš hospodárným způsobem, je zvětšení průtoku, čehož může být docíleno zvýšením tlaku čerpadel, čímž pádem ovšem výrazně vzrostou provozní náklady. Jednodušším způsobem je tedy změna tepelného kroku, ať již snížením teploty odváděného média, nebo zvýšením teploty přívodního média. Z této skutečnosti pak vyplývá snadnější regulace než v případě parních sítí. [24]

Specifikem při konstrukci vodních potrubí, zejména horkovodního typu, je udržení potřebného tlaku v potrubí. Pokud by tlak v potrubí poklesl pod mez sytosti vodních par, začalo by docházet k odpařování, a v potrubí by docházelo k rázovým jevům. Kontrola dostatečného tlaku se provádí především na přívodní větvi, na odvodní větvi by, kvůli nižším teplotám média než je bod varu při atmosferickém tlaku, nemělo k odpařování docházet. Médium je v soustavě

2.1. TECHNOLOGIE DÁLKOVÉHO VYTÁPĚNÍ

cirkulováno za pomoci oběhových čerpadel, která vytvářejí dostatečný tlak nejen pro udržení tlaku nad mezí sytosti par, ale také pro překonání hydrodynamických tlakových ztrát. [24]

2.1.3. Spotřebitelské předávací stanice a sekundární rozvody

Spotřebitelské výměňkové stanice, dále PS, jsou zařízení, která slouží k úpravě parametrů vstupního teplotnosného média dle požadavků odběratele a jeho následného dodání přímo k odběrateli, pomocí sekundární rozvodné sítě. V PS mohou být pro odběratele připraveny zpravidla tyto tři suroviny: [24]

- **vodní pára** - může být upravena do takových parametrů (co se tlaku a teploty týká), jaké nejvíce vyhovují konkrétnímu spotřebiteli
- **ohřevová voda** - sloužící k vytápění objektu, její teplota je závislá na tepelném kroku vytápěcích systémů, tedy na hodnotě rozdílu teploty topného média a okolí. To bývá obvykle v rozmezí 70-90°C
- **teplá užitková voda** - sloužící například k umývání nádobí nebo ke koupeli. Musí splňovat všechny hygienické požadavky dané pro pitnou vodu, i přesto však není ke konzumaci doporučována. Její spotřeba není, na rozdíl od ohřevové vody, výrazně závislá na počasí.

Mezi další kritéria, podle kterých se PS dělí, patří například druh primárního a sekundárního média. Můžeme rozlišit tyto základní typy stanic:(uváděné dle klíče **primér-sekundér**) [24]

- **pára-pára** tzv. *redukční stanice*, sloužící k výraznému snížení tlaku páry
- **pára-voda** tzv. *výměníky pára-voda*, kde je skupenské teplo páry přetvořeno na hmotnostní teplo kapalné vody
- **voda-pára** tzv. *odparníky* kde je generována pára, obvykle o nízkých tlacích
- **voda-voda** tzv. *výměníky voda-voda*, sloužící k předávce tepla mezi dvěma uzavřenými sítěmi, přičemž v obou slouží jako teplotnosné médium voda.

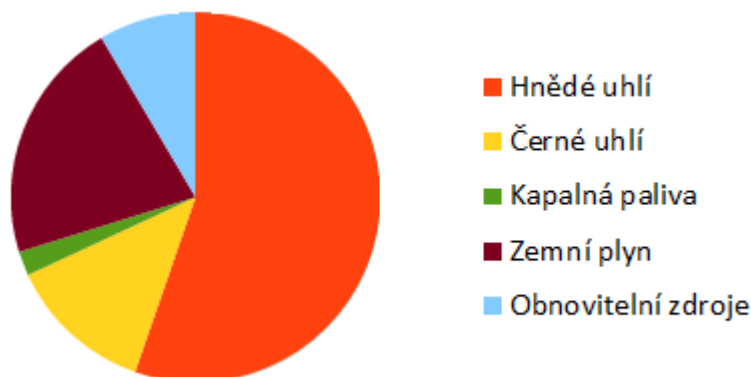
Posledním měřítkem, dle kterého dělíme PS je tlaková závislost. Tlakově závislé soustavy jsou přímo spojené s primární soustavou, nedojde tedy k předávce tepla mezi dvěma různými médii (nehledě na druh média), ale pouze k úpravě parametrů média. Výhodou tlakově závislých soustav je především znatelné snížení nákladů [29], spojených s vybudováním takovéto soustavy. Naproti tomu tlakově nezávislé soustavy využívají dvě samostatné cirkulační sítě, což je nákladné. Obecně se upřednostňují sítě tlakově závislé, pokud je to z technologických důvodů možné.

Dle způsobu úpravy tepelné vody pak rozlišujeme i celý teplotrenský systém dle počtu trubek primárního potrubí. Pokud je v PS odděleně z primárního média připravována zvláště TUV a ohřevová voda, jedná se dvojtrubkový systém (1 přívodní a 1 odvodní potrubí). Takové řešení je modernější a úspornější. Naproti tomu ve starších SCZT bylo dopravováno médium pro přípravu TUV a ohřevové vody odděleně, takzvaným čtyřtrubkovým systémem (2 přívodní a 2 odvodní potrubí). Dále mohou existovat i jednotrubkové systémy, ve kterých úplně chybí vratné potrubí. Tento způsob vedení tepla se využívá buď k vedení páry přímo k odběrateli anebo k vytápění více sériově zapojených těles naráz. [27]

2.2. Stav sítí centrálního zásobování teplem v ČR

V České republice jsou dodávky tepla pomocí centralizované sítě relativně hodně rozšířené, alespoň ve srovnání se západní částí EU. Celkový tržní podíl tepla, distribuovaného pomocí SCZT je v České republice cca 35 %, například v sousedním Německu je to však pouze 12 % a ve Francii dokonce pouze 4 procenta. Některé státy však mají podíl tepla distribuovaného centralizovaně ještě vyšší, například v Polsku je to přes 50 % [30]. Z těchto faktů lze tedy usuzovat, že objemový stav distribučních sítí v ČR rozhodně není na špatné úrovni, na druhou stranu by ale mohl být na úrovni daleko vyšší. Ze státní energetické koncepce potom plyne, že Česká republika si bere za cíl „podpořit územní rozvoj soustav zásobování teplem tam, kde je to reálné a efektivní, s cílem využití přebytku tepelného výkonu v důsledku úspor v budovách“ [7]. Je tedy patrné, že se v ČR i do budoucna počítá se zvětšujícím se podílem tepla dodávaného centrálně, což vytváří dobrou platformu pro EVO, neboť množství odebíraného tepla je velmi důležité pro plánování projektů EVO, což je více rozebráno v kapitolách 3.1 a 4, a pro dosažení potřebného faktoru R1, zmíněného v podkapitole 1.2.1.

Teplo dodávané do teplárenských sítí pochází z různých zdrojů, což může být považováno za výhodu této metody, neboť chod sítě není závislý jen na jednom palivu. V ČR je stále velké množství tepla vyráběno z hnědého uhlí [30], ze kterého proudí ke spotřebitelům teplo o velikosti cca 130 PJ/r. Z obnovitelných zdrojů, mezi které se počítá i výrazná část odpadu, je to pak pouze cca 20 PJ/r. Podíly tepla, dodaného do CZT z různých druhů paliv, jsou pak graficky znázorněny na obrázku 2.3. Z této statistiky je patrné, že spalovny odpadu jsou tedy zatím pouze druhotnými zdroji.



Obrázek 2.3: Zdroje tepla v sítích CZT v ČR v roce 2011 [30]

2.3. Srovnání centrálního a individuálního zásobování teplem

Dodávky tepla ze SCZT s sebou nesou určitá specifika oproti individuálnímu vytápění. Nejprve je nutné podotknout, že klady i zápory mají obě tyto strategie a nelze tedy plošně určit, který způsob vytápění je lepší. Při volbě optimálního řešení samotného vytápění objektu tedy záleží především na charakteristikách dané stavby, zejména z hlediska umístění, druhu zástavby atd. Ne vždy je možné mezi druhy vytápění volit, například u novostavby vznikající na osamoceném místě lze asi jen těžko předpokládat napojení na SCZT, neboť protažení sítě na danou lokalitu by bylo finančně velmi náročné. V případě spalování odpadu se však nevyplatí uvažovat nad ničím

2.3. SROVNÁNÍ CENTRÁLNÍHO A INDIVIDUÁLNÍHO ZÁSOBOVÁNÍ TEPLEM

jiným, než právě dodávkou tepla ze SCZT, zejména z důvodů velké technologické a finanční náročnosti spaloven odpadu, jak je uvedeno v kapitole 1.3.

Zásobování ze sítě CZT je výhodné z mnoha důvodů. Najít se jich dá celá řada, pro ilustraci je to například toto:

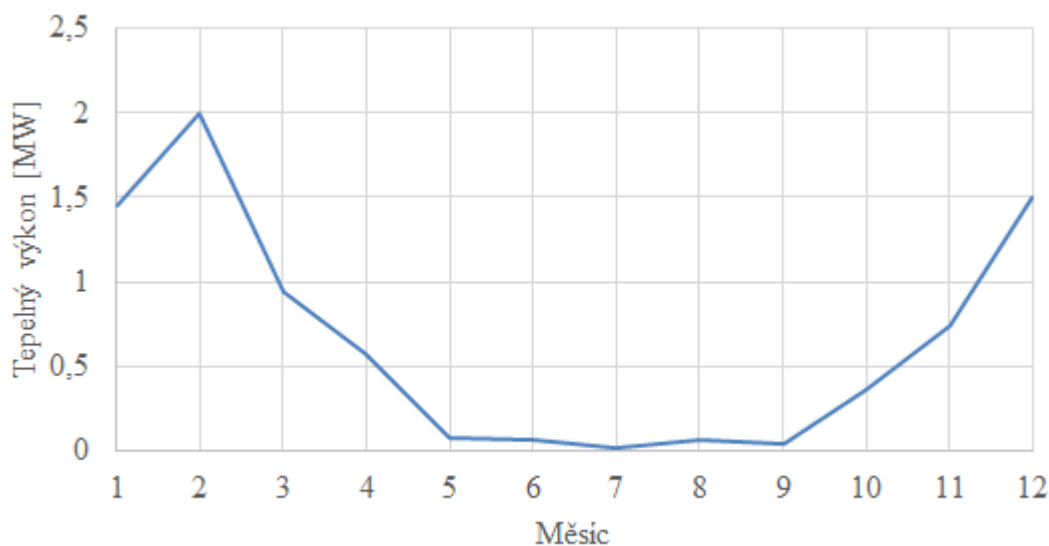
- **Úspora prostoru a času pro spotřebitele** - především z toho důvodu, že ve vytápěných objektech nemusí být přímo umístěn zdroj tepla. Stejně tak se spotřebitel nemusí starat o plynulý chod zdroje tepla, neboť tuto starost za něj vyřeší technici teplotrenských sítí.
- **Rychlý náběh vytápění** - při využití tepla ze sítě CZT stačí spotřebiteli pouze počkat na to, až se vymění studená voda v radiátorech za teplou, pocházející ze sítě. V případě vytápění individuálním zdrojem však musíme počítat s určitou náběhovou dobou, po kterou nám kotel nebude dodávat dostatečně teplou vodu. Odběr tepla ze SCZT s sebou tedy nese i určitý spotřebitelský komfort.
- **Možnost KVET** - představuje pravděpodobně největší výhodu CZT. Možnost vyrábět teplo kogeneračně s sebou nese možnost zužitkovat jinak odpadní energii při výrobě elektřiny.
- **Možnost využití velké škály alternativních paliv** - samozřejmě i v případě individuálního spalování lze využít alternativní či obnovitelné zdroje, jako příklad může sloužit spalování dřeva v krbu nebo přitápění pomocí fotovoltaických panelů. Odběr tepla ze SCZT však umožňuje i využití dalších paliv, například právě odpadu, jehož ekologické spalování v individuální jednotce by bylo technicky velmi náročné.

To je pouze malý výběr výhod odběru tepla ze SCZT. Další výhody, ale i nevýhody, rozebírá například studie [31], věnovaná stavu CZT v Jižní Korei.

Odběr tepla ze SCZT s sebou také nese i řadu nevýhod, které mohou být buď konstrukčního, nebo ekonomického rázu. Zvláště v případě velkých, rozvětvených sítí je potřeba vybudovat řadu podpůrných prvků, jako jsou výměňkové stanice mezi primární a sekundární sítí, cirkulační čerpadla atd. [15] Další nevýhodou mohou být větší tepelné ztráty, kvůli potřebě vést teplo na relativně velké vzdálenosti, a z toho vyplývající potřeba vyprodukovat o to více tepla. Pro konečného zákazníka pak může odběr tepla ze SCZT představovat i finanční zátěž. Není totiž schopen ovlivnit druh paliva, které je používáno pro generování tepla, a tím pádem ani není schopen příliš ovlivnit cenu.

2.4. Fluktuace poptávky po teple

Poptávka po teple není konstantní, jak již bylo zmíněno v předchozích částech práce. Je závislá na počasí a jiných vlivech, které zvyšují nebo snižují potřebu tepla, například sezónních výkyvů průmyslových výroby. Jak bylo již zmíněno v podkapitole 2.1.1, pokrytí poptávky po teple je jedním z nejdůležitějších kritérií při návrhu zdrojů tepla v rámci SCZT. Optimalizací jmenovitého výkonu zdroje jsme schopni výrazně snížit provozní náklady zdroje. Na obrázku 2.4 je názorně ukázán proměnný charakter průměrné měsíční poptávky po teple na příkladu reálné



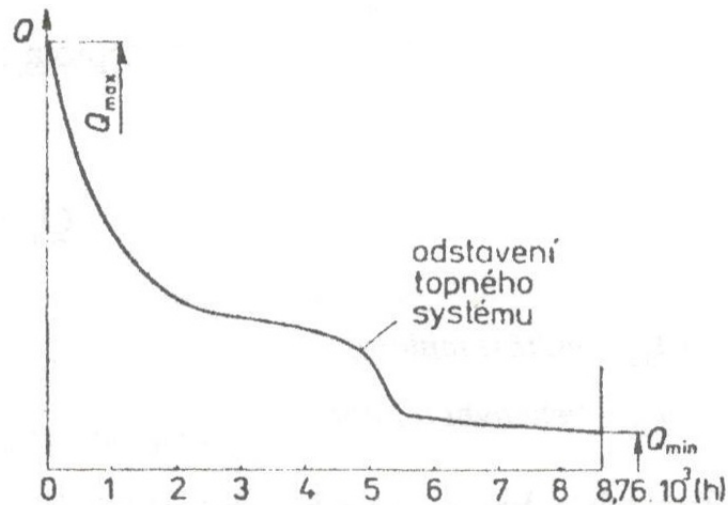
Obrázek 2.4: Měsíční poptávka po teple

teplárny. Použité údaje jsou za rok 2012 a byly poskytnuty Ústavem procesního a ekologického inženýrství na fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, dále jen ÚPI. Z obrázku lze pozorovat zvýšenou poptávku po teple v zimních měsících, což se zdá být logické v kontextu použití tepelné energie pro vytápění obytných prostor. Naopak v letních měsících je poptávka po teple relativně nízká, nikoliv však nulová. Teplo je v těchto měsících využíváno převážně pro ohřev TUV.

Již z proměnného měsíčního průměru je zřejmé, že zdroje tepla v rámci sítě musí být schopny pokrýt širokou škálu výkonů. Kromě regulace výkonu jednotlivých stálých zdrojů se pak zvýšená poptávka řeší zapojením přídatných zdrojů. Naopak při nízké poptávce obvykle dochází k technologické odstávce. Pro optimalizaci tepelného výkonu hlavního zdroje [15] obvykle slouží určité modely, vypracované na základě průměrných poptávek po teple za minulé roky.

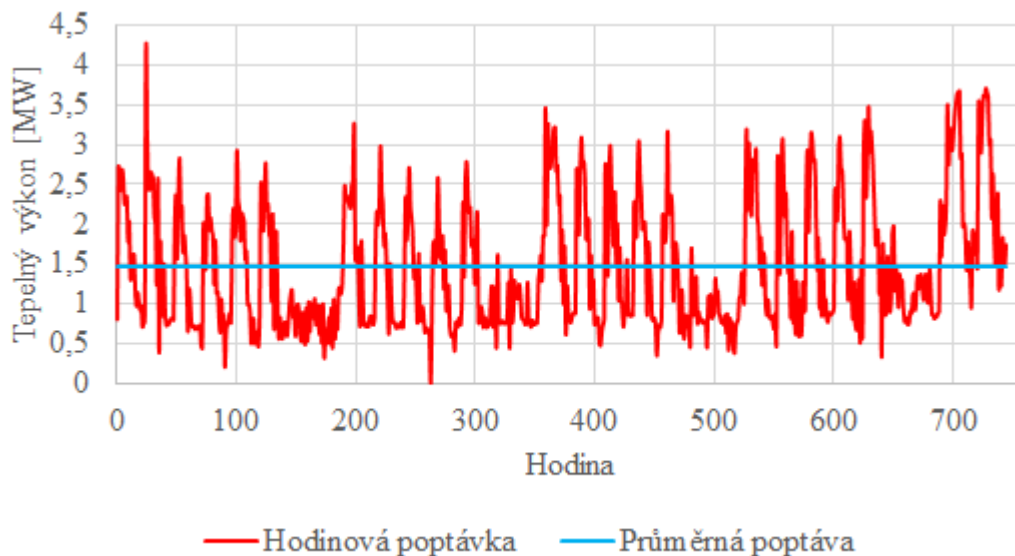
Pro účely projektování tepelné sítě je potom vhodné sestavit diagram trvání zatížení [15]. Na ose x je pak vyneseno čas, zatímco na ose y uvádíme zátěž topného systému. Diagram lze snadno vytvořit graficky, za pomoci grafu průměrné poptávky v daném časovém úseku. Nejvyšší výkon je pak vyjádřen v diagramu pro nejmenší počet hodin, zatímco nejnižší výkon je v diagramu zobrazen na konci sledovaného časového úseku. Z diagramu lze poté snadno odečíst počet hodin, při kterých byl dodáván výkon o určité velikosti. Typický diagram zatížení, modelovaný na základě požadovaného výkonu v městské tepelné síti, je zobrazen na obrázku 2.5. Pro městské zatížení je navíc typický poměrně prudký pokles zatížení po odstavení topného systému.

2.4. FLUKTUACE POPTÁVKY PO TEPLE



Obrázek 2.5: Diagram trvání zatížení městského topného systému

Pro dimenzování zdroje tepla v rámci SCZT je také důležité brát v potaz i detail zatížení v jednotlivých měsících. Zvláště na hodinové poptávce v rámci konkrétního měsíce je totiž vidět velký vliv tzv. špiček poptávky. Špičky poptávky jsou ilustrovány na obrázku 2.6, který zobrazuje detailní rozbor poptávky po teple v rámci reálné sítě, jejíž měsíční rozbor byl zobrazen na obrázku 2.4. Konkrétně se jedná o hodinový rozbor pro měsíc leden. Kromě hodinových odběrů



Obrázek 2.6: Hodinová poptávka po teple v reálné SCZT za leden 2012

je na obrázku 2.6 zobrazena také průměrná měsíční poptávka. Pokud bychom tedy dimenzovali výkon tepelného zdroje na hodnotu průměrné měsíční poptávky, plocha oblastí mezi křivkou průměru a křivky denních poptávek vyšších, než průměr, bude představovat výkon, který bude muset být pokryt z jiného zdroje. Stejně tak ale můžeme pozorovat oblasti, ve kterých se denní poptávka dostává na hodnoty nižší, než je hodnota průměru. V takových oblastech zvládne pokrýt celou poptávku jeden zdroj. Vzhledem k faktu, že regulace zdrojů nebývá okamžitá, nastane v místě výkyvů hodinové poptávky pod průměrnou hladinu přebytek dodávaného tepla, které musí být mařeno, a dochází ke snížení účinnosti celého cyklu. Dimenzování výkonu hlavního zdroje je tedy velmi důležitým problémem, který je potřeba řešit.

2. CENTRÁLNÍ ZÁSOBOVÁNÍ TEPEM

Pokud bychom nastavili maximální uvažovaný výkon zdroje na průměrnou měsíční hodnotu poptávky, výkonové špičky budou mít „nejvýraznější vliv“ a při odhadování reálného výkonu, který bude zdroj dodávat za měsíc do sítě, se dopustíme největší chyby [32]. Zdroj totiž nebude schopen pokrýt velké množství špiček. Stejně tak bude chybně zhodnoceno i pokrytí propadů v poptávce. Před stavbou hlavního zdroje je tedy dobré zkoumat jeho maximální uvažovaný výkon i z pohledu ekonomiky provozu. O způsobech odhadu ekonomické rentability uvažovaného výkonu pojednává blíže kapitola 4.

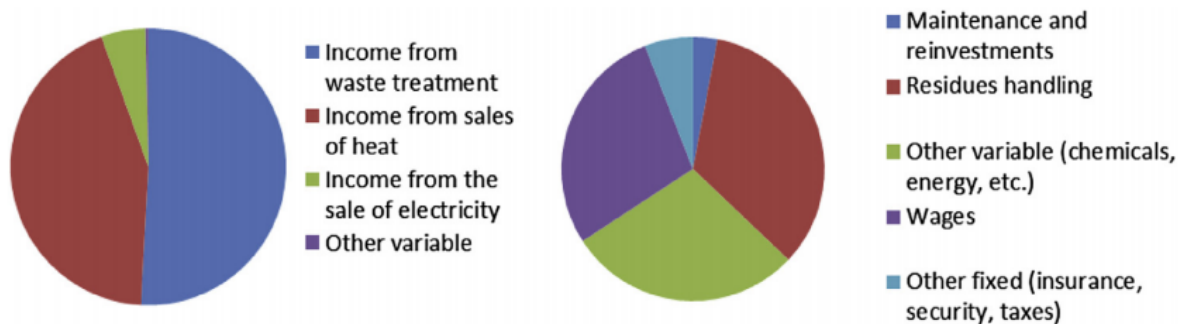
3. INTEGRACE SPALOVNY ODPADU DO SÍTĚ CZT

Výstavba ZEVO představuje významnou investici, a to především kvůli ceně technologií potřebných například pro dodržení legislativních limitů, nebo udržení garance výhřevnosti. Je také potřeba si uvědomit, že jen samotné plánování a schvalování výstavby ZEVO je proces, který může trvat několik let [33]. Životnost ZEVO se pak zpravidla plánuje nejméně na 20 let. Pro úspěšné zavedení ZEVO do stávajícího teplárenského provozu je tedy ze všeho nejvíce potřeba kvalitní projekt, který se snaží brát v úvahu co nejvíce proměnných, a vytvoří pro investora kvalitní podklad, na základě kterého se může rozhodnout ZEVO vybudovat.

Faktorů, které jsou jakožto podmínky pro výstavbu ZEVO podstatné, je celá řada. Tato kapitola se zaměří především na nejvýznamnější faktory brané v potaz při plánování, uvedené v článku [33], který byl vypracován výzkumným týmem pracovníků z Ústavu procesního inženýrství při Vysokém učení technickém v Brně. Za nejdůležitější body jsou považovány problematiky ekologického a logistického plánování ZEVO. Nakonec práce shrne i některé další problematiky, které výstavbu ZEVO ovlivňují, byť je jejich význam nižší.

3.1. Ekonomické plánování ZEVO

Hlavním problémem, který bude investor řešit, je samozřejmě ekonomika výroby tepla za použití EVO. Ta souvisí v podstatě se všemi body, které budou v této kapitole uvedeny. Zvláštní pozornost je však věnována především tomu, jakým způsobem ZEVO generuje zisk, respektive co tvoří jeho náklady a výdaje. Jak je patrné z ilustračního obrázku 3.1, který znázorňuje



Obrázek 3.1: Příjmy (vlevo) a výdaje (pravo) typického ZEVO [33]

příklad typické teplárny s EVO, distribuující teplo pomocí horkovodní sítě, zisk ZEVO je tvořen zejména dvěma složkami: ziskem za zpracování odpadu a prodejem tepelné energie. Nezanedbatelný, avšak ne tak výrazný zisk je pak například ze státní podpory, na kterou má ZEVO nárok v případě, že její výkon při výrobě elektrické energie [34] nepřesáhne 7,5 MW, a který pak při splnění dalších podmínek (dostatečná účinnost a zamezení společnému spalování neobnovitelných zdrojů) činí 50 Kč/GJ tepelné energie. Naproti tomu zisk za zpracování odpadu, neboli tzv. „cena na bráně“ za odpad, činil například ve spalovně odpadu v Brně [35] 850 Kč bez DPH za 1 tunu komunálního odpadu. Zde je potřeba zdůraznit, že zatímco v případě konvenčních elektráren se vstupní surovina nakupuje, v případě spalovny je naopak zisk generován již při nabytí suroviny. Na rozdíl od prodeje tepla je navíc zisk z likvidace odpadů celoročně stabilní,

3. INTEGRACE SPALOVNY ODPADU DO SÍTĚ CZT

což umožňuje uvažovat v ekonomických modelech nepřetržitý provoz ZEVO (viz. kapitola 4). V případě, že je investorem veřejný subjekt například město, může být pokrytí této částky citlivým a důležitým problémem, neboť likvidace odpadu ve spalovně bude placená z poplatků za svoz odpadu. Této problematice bude věnována podkapitola 3.1.1.

Druhou nejvýznamnější částí, tvořící příjmy ZEVO, je pak pochopitelně prodej tepelné energie do sítě. Zatímco konečný zákazník zaplatí za GJ tepelné energie vyrobené z odpadu v závislosti na způsobu odběru v průměru okolo 610 Kč [36], výrobce energie z odpadu dostane zapláceno při předání do tepelné sítě okolo 200 Kč/GJ [36]. V tabulce níže jsou pak uvedeny průměrné ceny, placené při dodávce z různých zdrojů do SCZT za rok 2015. Komunální odpad je v ní zahrnut pod kolonkou „jiná paliva“. Při dodržení podmínky funkčnosti [33], že minimální

| Typ zdroje | Uhlí | Plyn ze soustavy | Biomasa | Topné oleje | Ostatní (včetně KO) |
|-----------------|--------|------------------|---------|-------------|---------------------|
| Výkon nad 10 MW | 231,46 | 352,63 | 227,51 | 318,01 | 214,76 |
| Výkon do 10 MW | 377,40 | 388,58 | 307,09 | 988,58 | 191,23 |

Tabulka 3.1: Srovnání cen tepla vyprodukovaného z různých paliv (v Kč/GJ) [36]

výhřevnost odpadu neklesne pod hodnotu 7 MJ/kg, pak tedy ZEVO vyprodukuje z jedné tuny odpadu hrubý zisk (uvažujeme zdroj nad 10 MW a tedy cenu za GJ 214,76 Kč) 1503,32 Kč. To činí, při odečtení 15 % sazby DPH 1277,82 Kč za 1 tunu odpadu. Důvodem nižší výkupní ceny energie vygenerované z odpadu je pak především fakt, že výroba energie z konvenčních zdrojů, které jsou také zapojeny do sítě, je obvykle méně nákladná. Provozovateli tepelné sítě se tak vyplatí platit za energii vyrobenou v ZEVO pouze poměrnou část z variabilních nákladů, ušetřených při nezpracování konvenčních paliv. Variabilní náklady jsou takové náklady, které jsou přímo spojeny s přeměnou jednotky výchozí suroviny na jednotu konečného produktu. Pro jistotu dobrého plánování ZEVO je pak potřeba mít od provozovatele tepelných sítí garanci této výkupní ceny v určitém rozmezí na co nejdelší časový úsek.

3.1.1. Pokrytí nákladů za svoz odpadu

Schopnost ZEVO samostatně na sebe vydělat je vykoupěna vyšším poplatkem za svoz odpadu, který stanovuje obec, jak je uvedeno v podkapitole 1.2. Obec má pak dvě možnosti:

- dle § 17a zákona 185/2001 Sb. určit poplatek složený ze dvou složek, celkově v maximální výši 500 Kč a u fyzických osob je vázaný na místo současného bydliště. Jde o způsob preferovaný zejména velkými městy, kde žije více lidí, kteří mají trvalé bydliště jinde, například Praha. [4]
- dle § 10b zákona 565/1990 Sb. určit taktéž dvojsložkový poplatek v maximální výši 1000 Kč, který je povinná platit každá osoba s trvalým bydlištěm na území obce. Jedná se o metodu preferovanou menšími městy, výjimku tvoří statutární město Brno, které určuje poplatek za svoz odpadu právě podle tohoto zákona. [37]

U obou poplatků je druhá složka určena dle reálných nákladů na svoz odpadu za minulý kalendářní rok, rozpočítaných na množství poplatníků. Právě tato složka tedy může sloužit jako kompenzace za vyšší ceny, způsobené instalací ZEVO do sítě CZT.

3.2. Logistické plánování ZEVO

Dalším důležitým faktem, který musíme vzít v úvahu při plánování výstavby zařízení zpracovávajícího odpad energeticky, je vyřešení logistiky pohybu této suroviny. V tomto ohledu je důležité brát v potaz zejména dvě zásadní skutečnosti: [33]

- Nutnost zajistit stálý a ekonomicky co nejvýhodnější přísun odpadu
- Nutnost zajistit náhradní řešení zpracování odpadu v případě výpadku ZEVO

Zajištění stálého přísunu odpadu se může zdát v kontextu zvyšující se produkce odpadu, která byla zmíněna v podkapitole 1.1, zavádějící. Kromě rostoucího podílu recyklovaného odpadu se však po celé EU zvyšuje i podíl odpadu zpracovaného energeticky, respektive se staví nebo se alespoň počítá s budoucí výstavbou nových zařízení. Z tohoto důvodu se očekávají v budoucnu značné nárůsty v poptávce po odpadu, které již nebude schopen pokrýt trh v rámci jedné země. Například ve Spojeném království se očekává do roku 2020 nedostatek v produkci odpadu až 13800 kt/rok [38]. V sousedním Německu se pak ve stejném roce očekává nedostatek cca 3000kt/rok [38]. Vzhledem k tomu, že Evropská unie poskytuje na svém území legislativní platformu [12] pro přepravu odpadů, (jak bylo zmíněno v podkapitole 1.2.2), dá se v budoucích letech očekávat výrazný vzrůst významu odpadu, jakožto klasické tržní komodity. V budoucnu by se také dal očekávat případný nedostatek odpadů na trhu zvláště, pokud státy unie nebudou pečlivě plánovat kapacitu svých zařízení. Při plánování ZEVO na území ČR je tedy nutné zajistit, aby výkupní cena odpadu byla konkurence schopná ve srovnání s ostatními zeměmi EU. Toho je možné dosáhnout například i pomocí kvalitního systému přepravy a zpracování odpadu. K tomuto účelu slouží například optimalizační nástroj NERUDA [38], vyvíjený na ÚPI. Tento systém je schopen, na základě různých proměnných, vyhodnotit optimální lokality pro výstavbu spaloven o vhodných kapacitách.

Nevyužitá kapacita ZEVO však nemusí být nutně nevýhodou. Určitá rezerva v kapacitě umožňuje případnou dodávku odpadů, které by měly končit v jiných zařízeních, ale skončit tam z různých důvodů nemohou. Důvody pro výpadek ZEVO z provozu mohou být například plánovaného charakteru, jako je například technická odstávka, mohou být však způsobeny i nepředvídatelnými důvody, např. poruchou nějaké části centrály. V takovém případě je však potřeba ZEVO nahradit, zejména v oblasti likvidace odpadů. Právě v takovém případě mohou být dočasně využity „okolní“ spalovny, které mají rezervy v kapacitách. Jiným, avšak méně vhodným řešením, je pak existence rezervních skládek, na které by se odpad ukládal v případě výpadku ZEVO. Takové řešení například navrhovala analýza energetického využití odpadů [39] provedená v kraji Vysočina v nejméně jedné variantě plánované výstavby ZEVO u Jihlavy. Toto řešení se však v kontextu plánovaného zákazu skládkování v roce 2024 nejeví příliš koncepčně.

3.3. Další faktory při plánování ZEVO

Kromě garance stabilní výkupní ceny tepla a stálého přísunu odpadu je potřeba při stavbě ZEVO brát v potaz několik dalších faktorů. [33] V první řadě je to pak souhlas okolního obyvatelstva s výstavbou spalovny. Právě v tomto směru může i dobře naplánovaný projekt spalovny narazit na nečekanou překážku. Argumenty proti spalování odpadu jsou pak většinou zaměřeny na jejich zdravotní riziko pro okolní rezidenty, například na vznik nebezpečného odpadu (popílků ze spalín) který nemůže být již nadále využit. Dle názoru autora této práce je riziko pro okolní

3. INTEGRACE SPALOVNY ODPADU DO SÍŤE CZT

obyvatelstvo, zvláště díky přísným emisním limitům daným vyhláškou o přípustné úrovni znečištění [9], srovnatelná, nebo dokonce i nižší, než při použití konvenčních zdrojů, a obecné obavy ze ZEVO jsou v tomto ohledu spíše zbytečné. Na druhou stranu nakládání s toxickým popílkem, vzniklým při čištění spalin, představuje reálný problém, který je však, pouze podle názoru autora práce, zanedbatelný ve srovnání s problémy, které vznikají při skládkování všech složek odpadu (navíc zde dochází i k energetickému zužitkování).

Posledním hlavním problémem, který je třeba zmínit pro přípravu projektu výstavby ZEVO, je pak již v předchozích částech zmíněná potřeba udržet minimální výhřevnost odpadu na hodnotě 7,5 MW/t [33]. Pro stabilní udržení alespoň této hodnoty je třeba homogenizovat odpad [2] i s kombinací jeho složek, které mají vysokou výhřevnost.

4. DIMENZOVÁNÍ VÝKONU ZAŘÍZENÍ EVO

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 2.4 věnované proměnnému charakteru poptávky po teple, návrh výkonu tepelného zdroje, v našem případě ZEVO, vychází z poptávky po teple v dané lokalitě za předchozí roky. Pro vytvoření prognózy ekonomické rentability zařízení je pak důležité tento výkon zhodnotit a na jeho základě předpovědět skutečný výnos centrály na prodeji tepelné energie. V této části bude stručně vysvětlen a na příkladu reálné SCZT použit přístup k řešení tohoto problému, který byl blíže představen v článku [32], publikovaném výzkumnými pracovníky ÚPI.

Hlavní snahou tohoto přístupu k řešení je zpřesnění odhadu ekonomického zhodnocení ZEVO při daném výkonu při zachování rozumného výpočetního času. Toho je docíleno virtuální korekcí maximálního výkonu zařízení dodávajícího tepelnou energii do SCZT za použití průměrné měsíční poptávky po teple a maximálního výkonu ZEVO. Právě použití průměrné měsíční poptávky na místo denní nebo hodinové pak vede ke snížení výpočetního času. Princip fungování této korekce bude vysvětlen v následující podkapitole 4.1.

Cílem této části práce je pak představit dva různé korekční modely maximálního výkonu a demonstrovat jejich použití na příkladu reálné nejmenované SCZT. První model byl vytvořen autorem práce, druhý byl pak poskytnut ÚPI. Východí data byla taktéž poskytnuta ÚPI.

4.1. Flukтуаční koeficienty

Jak již bylo zmíněno, při plánování výstavby ZEVO, respektive jakéhokoliv teplotního zdroje, počítáme obvykle s určitou poptávkou po teple v rámci konkrétní SCZT, vytvořenou na základě statistických dat z minulých let, a na jejím základě můžeme vytvořit prognózu výnosnosti zařízení. Takový přístup však naprosto zanedbává výkyvy v poptávce, které byly představeny v podkapitole 2.4. Pro zpřesnění odhadovaného výkonu tedy můžeme použít tzv. flukтуаční koeficienty, jejichž princip detailněji vysvětlený v již zmiňovaném odborném článku [32], se dá jednoduše popsat na základě vztahu mezi reálným výkonem a teoretickým maximálním výkonem teplárnou, matematicky vyjádřeném rovnicí 4.1.

$$P'_{max} = P_{max} \cdot C \quad (4.1)$$

přičemž významy jednotlivých členů rovnice jsou následující:

$$\begin{aligned} P'_{max} & \dots \text{virtuální hodinový maximální výkon zařízení [GJ/h]} \\ P_{max} & \dots \text{teoretický hodinový maximální výkon zařízení [GJ/h]} \\ C & \dots \text{flukтуаční korekční koeficient [1]} \end{aligned}$$

Virtuální hodinový maximální výkon je pak takový výkon, který teplotna za daný měsíc reálně dodává do sítě. Hodnota flukтуаčního koeficientu, který je v rovnici 4.1 značen jako C , pak bude vždy ≤ 1 . To je způsobeno právě fluktuací poptávky, popsané v podkapitole 2.4. Důvod takového hodnot koeficientu je následující: provoz ZEVO uvažujeme nepřetržitý (důvodem je neustálý výnos za likvidaci odpadu, popsaný v podkapitole 3.1), a ZEVO tedy může do sítě dodávat tepelnou energii buď plným výkonem (v době, kdy poptávka po teple překračuje maximální uvažovaný výkon ZEVO), nebo může dodávat teplo pouze částí výkonu, která je úměrná aktuální poptávce v době, kdy je poptávaný výkon nižší, než maximální uvažovaný výkon ZEVO.

Přístup k odhadu reálného výkonu pomocí flukтуаčních koeficientů pak s sebou nese další nespornou výhodu. Všechny výpočty jsou totiž prováděny na základě průměrných měsíčních dat (ať již poptávky, nebo skutečně dodávaného výkonu), což vede ke značnému zjednodušení výpočtu při zachování přijatelné přesnosti odhadu. V již zmiňovaném článku [32] je pak popisována přesnost modelu na měsíční bázi, za použití flukтуаčních koeficientů, jako srovnatelná s modelem, vytvořeným na denní bázi. Článek se pak dále zabývá i způsobem, kterým jsou tyto koeficienty použity pro lepší odhad rentability ZEVO.

V obou níže rozebraných případech je výkon při výpočtech vyjádřen v jednotkách GJ/h, místo v klasických jednotkách SI - Watech. Je to především z důvodu větší názornosti při zobrazování do hodinových grafů. Všechny výpočty v následující části práce pak byly provedeny pomocí tabulkového procesoru Office Excel od firmy Microsoft. Jsou založeny na skutečných datech, pocházejících z poptávek, kladených na reálné teplotné sítě. Výpočtové sešity jsou dostupné v elektronické podobě v příloze k této bakalářské práci.

4.2. Jednoduchý korekční koeficient na měsíční bázi

Cílem tohoto modelu je stanovit flukтуаční koeficienty na měsíční bázi pouze v závislosti na reálné a teoretické průměrné dodávce za každý měsíc v roce. Model slouží pro ilustraci existence korekčních koeficientů a zobrazuje vhodnost jejich využití. Koeficienty v tomto modelu jsou založeny pouze na podílu průměrného reálného výkonu, který byl dodáván do sítě, a teoretického výkonu, který by byl dodáván v případě, že by pro celý tepelný výstup existovala neustálá poptávka. V modelu není počítáno s nutností odstávky zdroje. Stejně tak se předpokládá, že zdroj dokáže plynule pokrývat poptávku od 0 do 100 % maximálního výkonu. ZEVO je v provozu nepřetržitě, a pokud poptávka překročí jeho maximální výkon, je možné okamžitě zapojit do sítě přídatnou teplotnu, u které se taktéž počítá s plynulou regulací výkonu. Tuto teplotnu je taktéž možné kdykoliv okamžitě odstavit. Kromě popisu výpočtu koeficientů bude v této části taktéž představeno pozorování závislosti koeficientů na dimenzovaném maximálním výkonu ZEVO, respektive jeho poměru s poptávkou po teple.

4.2.1. Výpočetní postup

Výchozí data byla na hodinové bázi, respektive popisovala poptávku po teple každou hodinu v roce v rámci reálné sítě centrálního zásobování. Aritmetickým průměrem ze všech hodinových dat byla určena průměrná hodinová poptávka po teple 44,46 GJ/h. Hodnota maximálního hodinového výkonu byla tedy zvolena jako **45 GJ/h**. Následně byly porovnány hodnoty poptávky a maximálního výkonu, z čehož byl vyhodnocen skutečný výkon, představující hodinovou dodávku užitečného tepla do sítě.

Pro lepší představení uvažovaného ZEVO, respektive jeho uvedení do reálného kontextu, lze také na základě zvoleného maximálního výkonu spočítat maximální kapacitu zařízení. Vztah, mezi zpracovatelskou kapacitou a maximálním výkonem lze matematicky vyjádřit následovně:

$$P_{\text{hodinov}} \cdot t = K \cdot P_{\text{paliva}} \cdot \eta \quad (4.2)$$

přičemž významy jednotlivých členů rovnice jsou následující:

$$\begin{array}{l} P_{\text{hodinov}} \dots \text{hodinový maximální výkon zařízení [GJ/h]} \\ t \dots \text{roční hodinový provozní fond [h]} \end{array}$$

4.2. JEDNODUCHÝ KOREKČNÍ KOEFICIENT NA MĚSÍČNÍ BÁZI

$$K \dots \text{roční kapacita [t]}$$

$$P_{\text{paliva}} \dots \text{výhřevnost [MJ/kg]}$$

$$\eta \dots \text{účinnost výroby tepelné energie [1]}$$

Pokud tedy budeme při zvoleném výkonu 45 GJ/h počítat s tím, že roční provozní fond bude 8000 hodin (počítáme s nepřetržitým provozem ZEVO a vysokou spolehlivostí [2]), výhřevnost paliva bude 10 MJ/kg [22] (více o výhřevnosti pojednává podkapitola 1.4), a účinnost výroby tepelné energie bude 80 % [32], po dosazení do rovnice 4.2 dostaneme maximální roční kapacitu zařízení 45 kt.

V další fázi výpočtu pak byly spočítány měsíční průměry poptávky a teoretické dodávky dat na hodinové bázi. Průměrná skutečná poptávka pak byla znovu porovnána s maximální dodávkou, z čehož byla, obdobným principem, jako v prvním případě, vyhodnocena skutečná hodinová dodávka, tentokrát již však na bázi měsíčního průměru. Samotný korekční koeficient byl pak pro každý měsíc vypočítán jako poměr skutečné dodávky na měsíční bázi a denní bázi.

4.2.2. Prezentace výsledků

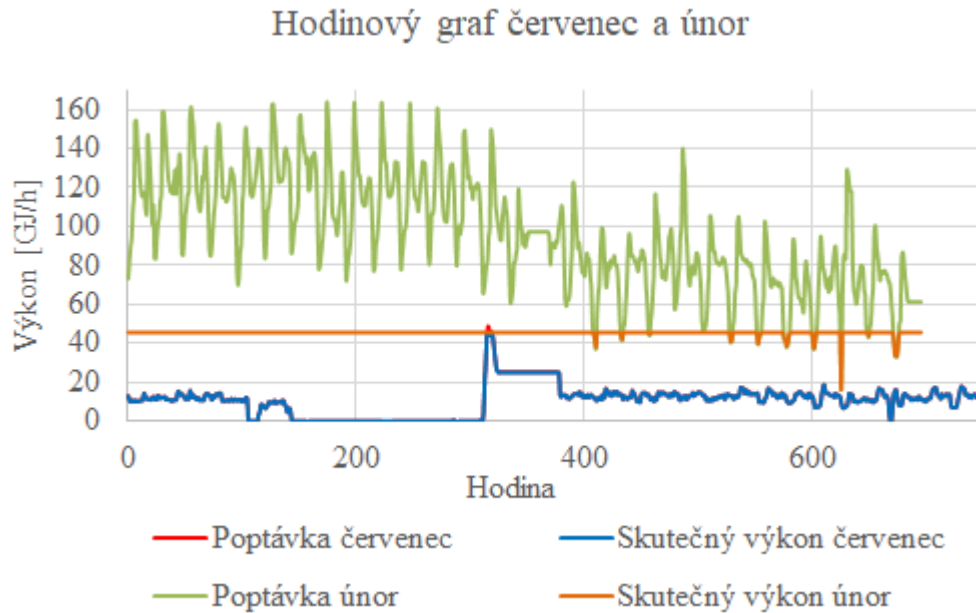
V tabulce 4.1 jsou pro srovnání uvedeny hodnoty průměrných hodinových poptávek v GJ/h, počítaných na denní, respektive měsíční bázi, při maximálním výkonu teplárny 45 GJ/h, ve vybraných měsících. Je vidět, že nejvyšší rozdíly mezi skutečnou dodávkou počítanou na základě hodinových dat a skutečnou poptávkou počítanou na základě měsíčního průměru, jsou v měsících, ve kterých se poptávka po teple blíží maximálnímu výkonu teplárny (například v říjnu). V takové situaci je totiž nejvýraznější vliv výkonových „špiček“. Naopak v měsících, kdy poptávka po teple výrazně převyšuje maximální výkon, nebo naopak maximální výkon výrazně převyšuje poptávku (například leden či květen), můžeme pozorovat menší rozdíly mezi skutečnými dodávkami, které byly spočítány na základě různých přístupů.

| Měsíc | 1 | 2 | 5 | 6 | 7 | 10 | 11 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Průměrná měsíční poptávka | 79.14 | 96.28 | 18.89 | 14.36 | 10.80 | 49.90 | 56.47 |
| Skutečná dodávka (denní) | 44.62 | 44.78 | 18.85 | 14.36 | 10.68 | 38.75 | 42.50 |
| Skutečná dodávka (měsíční) | 45 | 45 | 18.89 | 14.36 | 10.80 | 45 | 45 |

Tabulka 4.1: Rozdíly skutečné poptávky na denní a měsíční bázi ve vybraných měsících

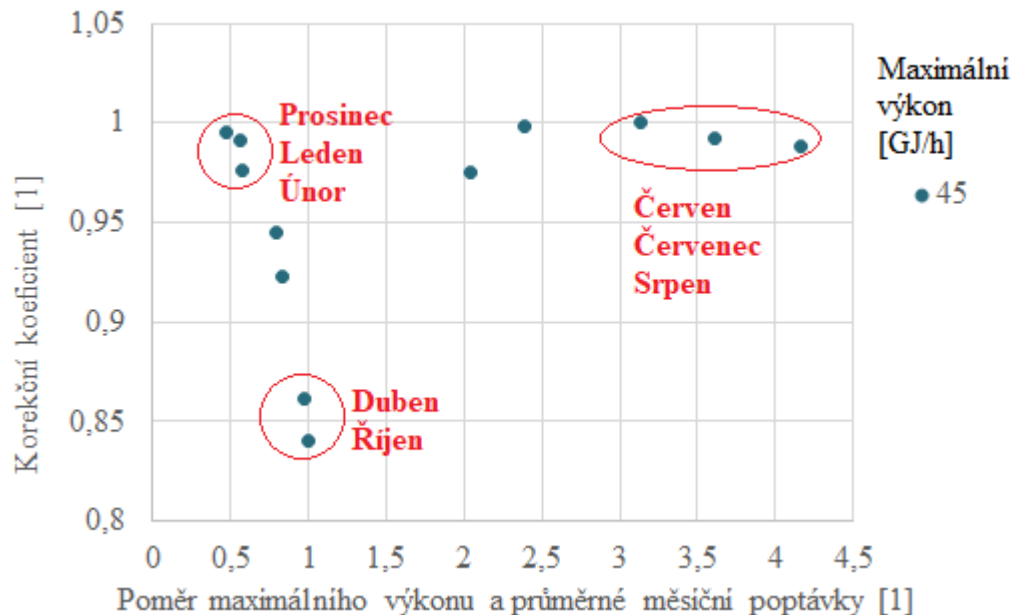
Pokrytí dodávky v měsících s nejvyšší, respektive nejnižší průměrnou poptávkou je pak zobrazeno na obrázku 4.1. Skutečná poptávka v tomto grafu je počítána na hodinové bázi, tedy každou hodinu bylo porovnáváno, kolik je poptáváno tepla a kolik je ho schopné dodat ZEVO. V případě měsíce února pak můžeme v grafu vidět, že je téměř každou hodinu v měsíci poptáváno více tepla, než je maximální výkon ZEVO, zařízení tedy dodává do sítě svou maximální kapacitu a výrazně vydělává na prodeji tepla. Naopak v případě července můžeme vidět, že poptávka za celý měsíc téměř nepřekročí maximální výkon ZEVO, a v grafu se tedy „kryje“ se skutečným červencovým výkonem. Pouze okolo 370. hodiny však skokově narostla poptávka tak, že kapacita ZEVO byla dokonce na několik hodin mírně překročena. Pro pokrytí celé poptávky pak musel být připojen špičkový zdroj s rychlým náběhem. Tento graf tedy poměrně dobře demonstrovuje výkyvy v poptávce ve vztahu k maximálnímu výkonu ZEVO.

Jak bylo uvedeno v původním článku [32], lze vyzpozorovat závislost korekčních koeficientů na poměru maximálního výkonu a průměrné měsíční poptávky. I v tomto případě pak bude nejvýraznější vliv výkonových špiček u těch měsíců, ve kterých se maximální výkon teplárny



Obrázek 4.1: Skutečná a teoretická dodávka tepla za červenec a únor

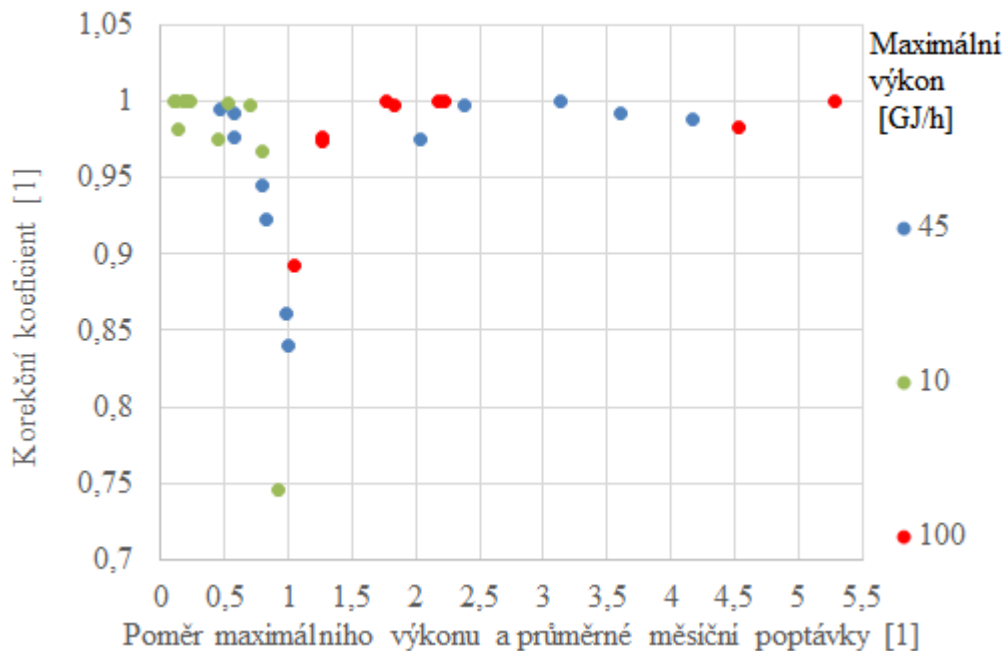
blíží průměrné poptávce. Graficky vyjádřenou závislost korekčních koeficientů na poměru maximálního výkonu a průměrné měsíční poptávky pak demonstruje obrázek 4.2. Na obrázku jsou i zvýrazněné měsíce, kterým jednotlivé koeficienty odpovídají. Koeficientů jde pak vytvořit



Obrázek 4.2: Závislost korekčních koeficientů na poměru max. výkonu a poptávky

více pro různé jmenovité maximální výkony, přičemž můžeme pozorovat podobné chování koeficientů v závislosti na poměru maximální dodávky a průměrné poptávky. Na obrázku 4.3 je pak zobrazeno několik sad různých koeficientů. Kromě prvního modelového příkladu a hodnot, ležících v jeho okolí, jsou zde zobrazeny i koeficienty pro max. výkon, odpovídající například mediánu roční poptávky (37), minimální měsíční poptávce (10), nebo například i pro výkon

4.3. KOREKČNÍ KOEFICIENT ZOHLEDŇUJÍCÍ VÍCE FAKTORŮ



Obrázek 4.3: Srovnání různých koeficientů pro různé maximální výkony

větší, než největší měsíční poptávka (100). Ve všech případech můžeme pozorovat nejnižší hodnotu koeficientu při hodnotách poměru maximálního výkonu a poptávky v okolí jedné.

4.2.3. Shrnutí příkladu a vyhodnocení výsledků

Tento příklad demonstroval existenci korekčních koeficientů na velmi zjednodušeném případu. Pomocí těchto koeficientů jsme pak schopni na základě relativně jednoduchého výpočtu na bázi měsíčních průměrů, shromážděných v dané lokalitě za minulé roky, schopni virtuálně upravit měsíční maximální výpočtový výkon. Tím jsme schopni zpřesnit výpočet ekonomické rentability zařízení, neboť dokážeme přesněji určit množství tepelné energie, která bude za daný měsíc v dané lokalitě vyprodukována, a následně i vykoupena do sítě centrálního zásobování teplem. Obecně zavedení koeficientů vede ke snížení odhadované rentability zařízení, avšak snížení je provedeno blíže k hodnotě, která odpovídá skutečné rentabilitě, a nedojde tedy k nadhodnocení projektu.

Hlavní výhodou užití koeficientů je pak úspora času, neboť nemusíme provádět výpočetní modely na denní bázi, které jsou relativně velmi náročné na strojový čas. Za použití korekčních koeficientů se dá tedy vytvořit projekt ZEVO za rozumný čas a s náklady a výnosy, které budou bližší realitě, než za běžného použití pouhých měsíčních průměrů poptávky.

4.3. Korekční koeficient zohledňující více faktorů

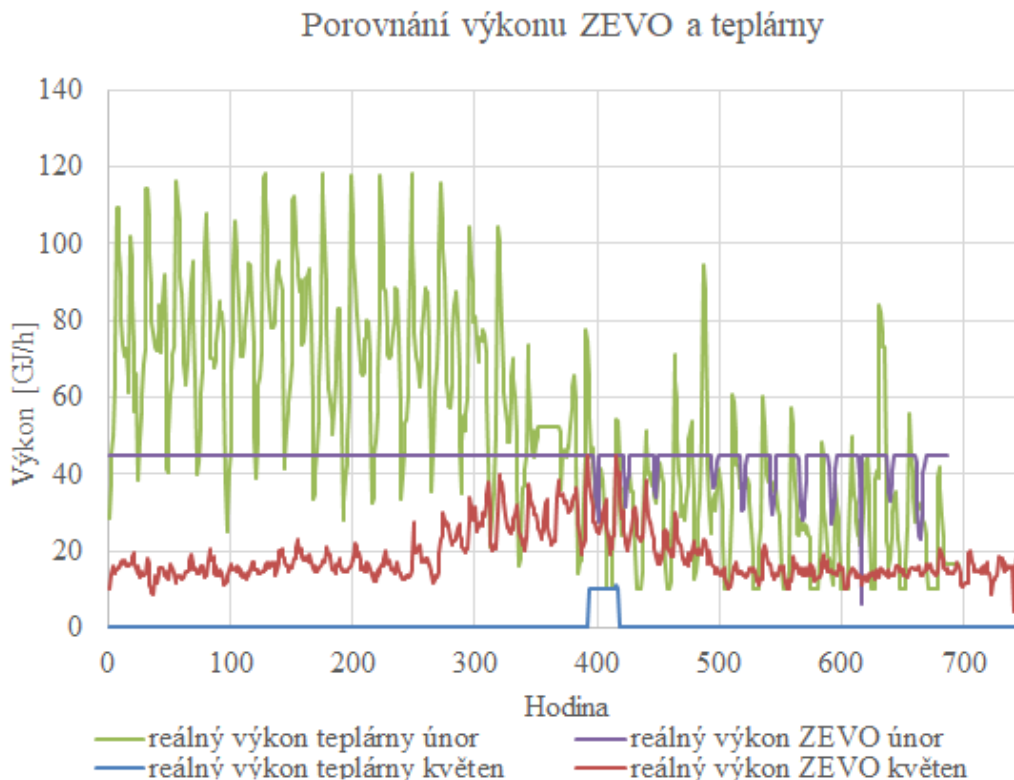
Modelování výkonu teplárny pro parametry více odpovídající realitě pochopitelně představuje komplexnější problém, než jednoduché modelování na základě průměrné měsíční poptávky a průměrné měsíční skutečné dodávky. Následující model, který vznikl na UPI, funguje obdobně, jako předchozí. Výpočet probíhá na základě uvažovaného maximálního výkonu ZEVO a průměrné měsíční poptávky. Stejně, jako v prvním modelu, i zde je počítáno s tím, že ZEVO

je v provozu nepřetržitě (znovu je důvodem stálá ekonomická výnosnost ze zpracování odpadu, zmíněná v podkapitole 3.1). Další tepelný zdroj (teplárna), který najíždí v případech, kdy poptávka překročí maximální výkon ZEVO, však musí být (na rozdíl od prvního případu) při poklesu poptávky pod maximální dodávku ze ZEVO odstaven alespoň po určitou minimální dobu. To vychází z předpokladu, že s každým najetím kotle jsou spojeny určité náklady, popřípadě dochází ke snížení jeho životnosti. Stejně tak je počítáno s tím, že kotel teplárny musí produkovat nějaký minimální výkon.

Výsledným produktem modelu jsou pak (stejně jako v prvním případě) korekční koeficienty, virtuálně upravující maximální výkon ZEVO. Takto získané koeficienty však ještě výrazněji ZEVO „znevýhodňují“, tedy dále snižují očekávanou ekonomickou rentabilitu. Pro větší názornost byla použita stejná vstupní data, jako v prvním případě. První případ také slouží jako referenční a bude k němu odkazováno při srovnávání obou modelů.

4.3.1. Výpočetní postup

Obdobně jako v prvním případě, i zde nejprve vyhodnocujeme data o pokrytí poptávky na hodinové bázi. Každou hodinu bylo vyhodnocováno, jakou část poptávky vykryje ZEVO a jakou teplárna. V případě nízké poptávky pak byl počítán počet hodin, po které by celou poptávku vykrylo ZEVO a provoz teplárny je tedy „zbytečný“. V případě, že počet hodin, kdy nemusí být teplárna v provozu, překročí kontinuálně nastavenou hranici minimální doby odstávky, je teplárna v modelu pozastavena, a dokud ji znovu není potřeba, nedodává do soustavy žádný výkon. Na rozdíl od prvního případu tedy již nepočítáme s ideálním zdrojem, který je schopen pouze pokrýt výkon, který nepokryje ZEVO, ale s reálným zdrojem, který vykazuje určité charakteristické chování. Na obrázku 4.4 je vyobrazen modelový případ pro ZEVO o



Obrázek 4.4: Srovnání reálných dodávek tepla ze ZEVO a teplárny

4.3. KOREKČNÍ KOEFICIENT ZOHLEDŇUJÍCÍ VÍCE FAKTORŮ

maximálním výkonu 45 GJ/h a teplárnu o minimálním výkonu 10 GJ/h. Jako minimální doba odstávky bylo počítáno 72 hodin. Vzhledem k tomu, že počítáme (stejně jako v předchozím případě) s nepřetržitým provozem ZEVO, maximální kapacita zařízení se tedy nemění a zůstává stejná jako v prvním případě.

Jak je z obrázku patrné, v měsících s velkou poptávkou po teple (únor) dodává ZEVO do sítě energii celým svým výkonem a teplárna dodává výkon, který po většinu času několikanásobně přesahuje její minimální výkon. Naproti tomu v měsíci, kdy již poptávka po teple není příliš vysoká, dodává teplárna teplo pouze v malém časovém úseku a navíc pouze při minimálním výkonu. S takto získanou reálnou poptávkou tepla ze ZEVO bylo poté postupováno stejně jako v prvním případě. Z hodinových reálných poptávek byly tedy spočítány měsíční průměry, které byly následně porovnány s průměrným reálným výkonem počítaným na měsíční bázi, čímž byly vytvořeny korekční koeficienty pro příslušný měsíc.

Stejně jako v prvním případě, i zde je možné počítat s více variantami maximálního výkonu ZEVO. Navíc jdou měnit další proměnné, konkrétně minimální výkon a minimální doba odstávky teplárny. Výpočty byly provedeny pro všechny možné kombinace nastavených parametrů, které byly voleny následovně:

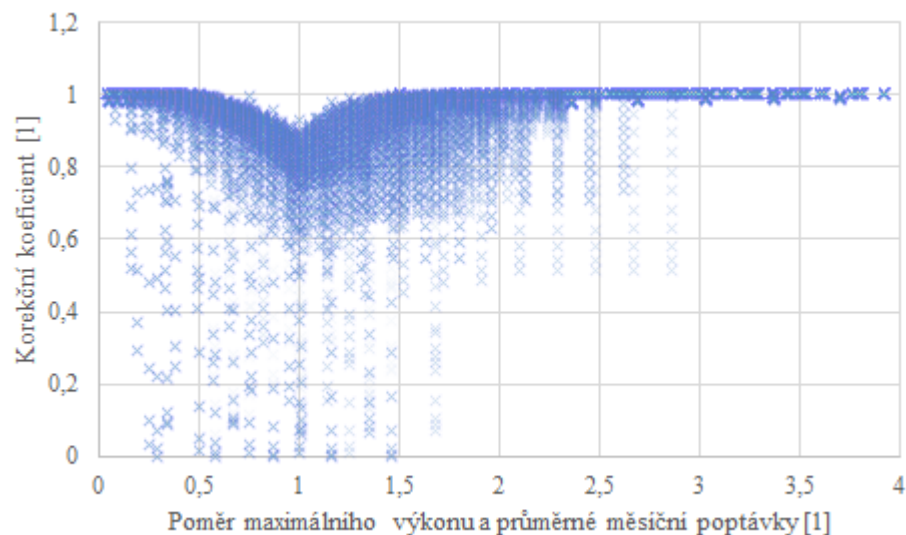
- **Maximální výkon ZEVO** od 1 do 163,55 GJ/h (což je hodnota maximální hodinové poptávky za celý rok, při takovém nastavení by se navíc jednalo o případ silně předimenzovaného kotle) po kroku 5 GJ/h
- **Minimální výkon teplárny** od 0 GJ/h (tedy od případu, kdy může teplárna fungovat nepřetržitě) do 81,775 GJ/h (což je hodnota rovná polovině maximální hodinové poptávky za celý rok) po kroku 10 GJ/h
- **Minimální doba odstávky** od 0 do 720 h (což představuje průměrnou dobu jednoho měsíce v roce) po kroku 24 h (tedy po jednom dnu)

Výpočetní kroky byly voleny s ohledem na smysluplnost výpočtu při udržení rozumného výpočetního času. Výpočet takového modelu pak trval na čtyř-jádrovém procesoru o taktu 2,7 GHz okolo dvaceti minut. Data, vyprodukovaná na základě tohoto modelu, jsou prezentována níže.

4.3.2. Vyhodnocení výsledků

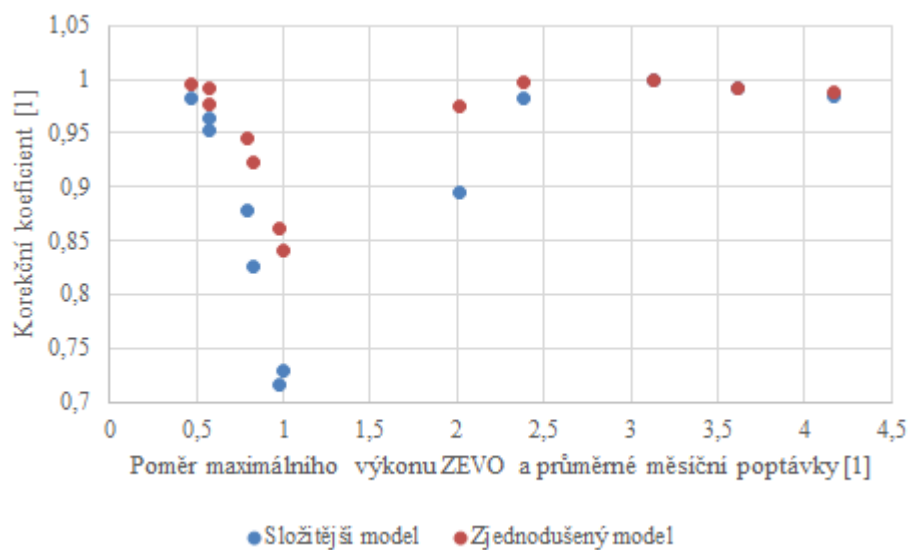
Na základě kombinace všech možností vstupních parametrů bylo výpočtovým modelem vy počítáno okolo 11400 různých koeficientů. Stejně jako v prvním případě můžeme pozorovat podobnou závislost na poměru maximálního výkonu ZEVO a průměrné měsíční poptávky. Závislost můžeme pozorovat na nepříliš přehledném obrázku 4.5. Stejně jako v prvním případě, i zde můžeme pozorovat nejnižší hodnoty koeficientů v okolí poměru, který je roven jedné. Na rozdíl od prvního případu je zde však vidět jasný důsledek počítání s reálnějšími parametry přídatné teplárny (minimální výkon a doba odstávky), což ještě více znevýhodňuje ZEVO. To se projevuje výrazným snížením hodnot korekčních koeficientů, které v některých případech mohou klesnout i k nule.

4. DIMENZOVÁNÍ VÝKONU ZAŘÍZENÍ EVO



Obrázek 4.5: Závislost všech korekčních koeficientů na poměru max. výkonu a poptávky

Pro větší názornost jsou na obrázku 4.6 zobrazeny koeficienty počítané pro modelový

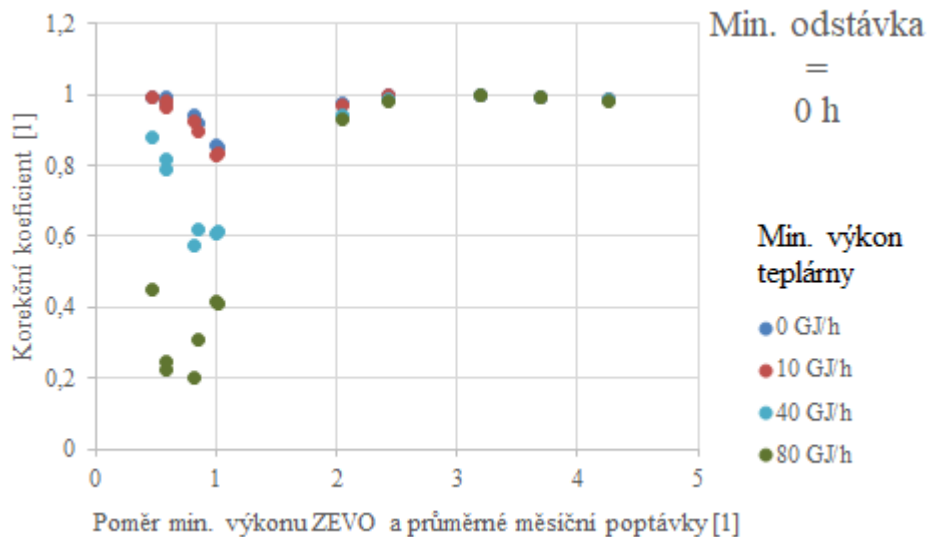


Obrázek 4.6: Závislost korekčních koeficientů na poměru max. výkonu a poptávky

případ (max. výkon ZEVO 45 GJ/h), uvedené v závislosti na poměru maximálního výkonu a maximální měsíční poptávky. U složitějšího modelu, ve kterém je počítáno i s minimálním výkonem teplárny 10 GJ/h a minimální dobou odstávky 72 h, můžeme pozorovat další snížení korekčního koeficientu. Dojde tedy k dalšímu virtuálnímu snížení maximálního výkonu, a tedy ke zpřesnění odhadované ekonomické výnosnosti.

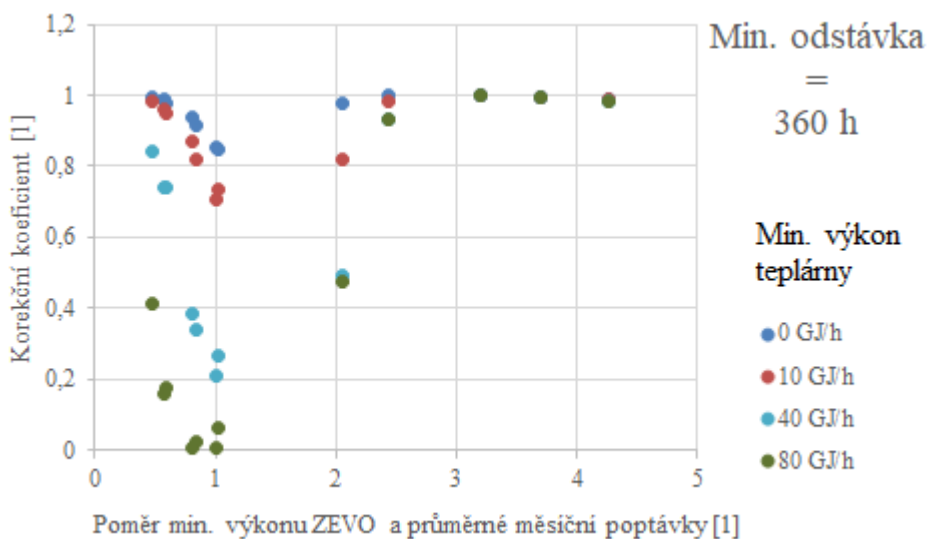
4.3. KOREKČNÍ KOEFICIENT ZOHLEDŇUJÍCÍ VÍCE FAKTORŮ

Pokud zafixujeme maximální výkon ZEVO na určité hodnotě (v dále uvedených případech je to 46 GJ/h), lze také pozorovat určité charakteristické chování koeficientů na základě minimálního výkonu přídavné teplárny a minimální doby odstávky. Na následujících obrázcích 4.7, 4.8 a 4.9 jsou zobrazeny korekční koeficienty znovu v závislosti na poměru maximálního výkonu ZEVO a průměrné měsíční poptávky. Pro řadu s minimálním výkonem přídavné teplárny o hod-



Obrázek 4.7: Korekční koeficienty při nulové minimální době odstávky

notě 0 můžeme pozorovat stejné hodnoty korekčních koeficientů ve všech třech případech. Z toho lze usuzovat, že při zvoleném minimálním výkonu teplárny 0 GJ/h nejsou korekce výkonu ZEVO závislé na minimální době odstávky teplárny. Když je počítáno s nulovou hodnotou minimálního výkonu teplárny, jedná se o nereálnou ideální situaci, kdy je teplárna schopna pokrýt okamžitě jakýkoliv rozsah výkonů. Jedná se tedy o zjednodušený model totožný s tím, který byl popsán v předchozí podkapitole 4.2. Se zvyšujícím se minimálním výkonem teplárny pak má

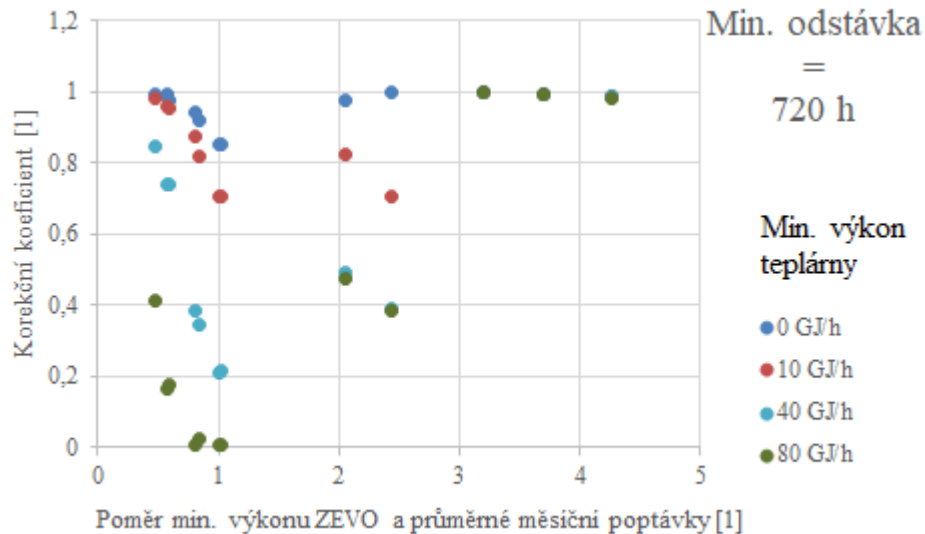


Obrázek 4.8: Korekční koeficienty při minimální době odstávky 360 hodin

hodnota koeficientů spíše tendenci klesat, stejně tak pro nenulové minimální výkony teplárny

4. DIMENZOVÁNÍ VÝKONU ZAŘÍZENÍ EVO

můžeme pozorovat tendenci hodnoty koeficientů spíše klesat se zvyšující se dobou minimální odstávky. Pro velké hodnoty minimálního výkonu teplárny (například řada, symbolizující případ s výkonem teplárny 80 GJ/h) pak můžeme pozorovat dokonce pokles korekčních koeficientů na hodnoty blízké nule.



Obrázek 4.9: Korekční koeficienty při minimální době odstávky 720 hodin

4.3.3. Shrnutí příkladu a vyhodnocení výsledků

Tento příklad se snažil demonstrovat výhody použití korekčních koeficientů, získaných na základě komplexnějšího výpočtového modelu. Bylo názorně ukázáno, že průběh koeficientů, vyjádřený v závislosti na poměru maximálního výkonu ZEVO a průměrné měsíční poptávky, má podobný charakter u obou dvou modelů. Koeficienty vypočítané přesnějším modelem jsou však nižší a celý model je tedy přesnější.

Pro co nejvyšší ekonomickou rentabilitu ZEVO by pak měla být snaha o udržení korekčních koeficientů na hodnotách co nejbližších jedné. V takovém případě jsme totiž nejlépe, respektive nejpresněji, schopni odhadnout reálné výnosy zařízení. Ze skutečnosti, že koeficienty mají tendenci klesat se zvyšujícím se výkonem přídavné teplárny a se zvyšujícím se minimálním časem její odstávky, lze usuzovat, že pro co nejekonomičtější provoz ZEVO je tedy dobré, aby jak minimální výkon teplárny, tak minimální doba její odstávky, byly co možná nejnižší. Takovýto směr optimalizace však nemusí být vždy možný. Zvláště při integraci ZEVO do již stávající SCZT musíme přizpůsobit parametry ZEVO již existujícím teplárnám, nikoliv naopak.

ZÁVĚR

Česká republika v oblasti výstavby nových ZEVO coby koncepčních řešení pro nakládání s odpadem za ostatními zeměmi západní části Evropské unie citelně zaostává. Problému nakládání s odpadem není věnována taková pozornost, jaká by byla třeba. To se projevuje nejvíce ve světle chystaného zákazu skládkování nezpracovaného odpadu, který by měl začít v ČR platit od začátku roku 2024. Platforma pro EVO je však v naší republice nedostatečná, a tak se zatím může zdát, že jediným řešením úpravy odpadů bude vyvážení do okolních zemí. Takové řešení je přitom z dlouhodobého hlediska neekonomické.

Tato skutečnost je poměrně překvapivá ve světle faktu, že v ČR existuje kvalitní základna pro stavbu a implementaci ZEVO. Jedná se především jak o základnu legislativní, která podmínky pro EVO vymezuje poměrně jasně, tak o základnu technologickou. Teplo, které spotřebitelé odebírají ze sítí centralizovaného zásobování, tvoří na trhu nezanedbatelný podíl okolo 35 %, což je kuriózně výrazně více, než ve státech s rozvinutější sítí ZEVO. Právě CZT představuje pro teplo vyprodukované pomocí EVO ideální distribuční systém. V Česku navíc existuje velká síť modernějších horkovodních sítí, u kterých pozorujeme oproti zastaralým parním menší přenosové tepelné ztráty.

Důležitým problémem při stavbě ZEVO je pak přesvědčit neobornou veřejnost o výhodách takového zařízení. Ač platí pro energetické využívání odpadu přísné emisní limity, je obava veřejnosti o své zdraví opodstatněná a je tedy úkolem inženýrů, aby v budoucnu nalézali nová řešení, která dopad spaloven odpadu na životní prostředí a zejména pak ovzduší zmírní.

Stavba ZEVO navíc představuje významnou investici, pro niž je zpravidla potřeba vypracovat detailní projektovou dokumentaci. Akademická sféra může poskytnout simulační nástroje, pomocí kterých můžeme například vyhodnotit optimální lokality pro stavbu nových ZEVO, nebo s určitou přesností odhadnout výdělečnost zařízení. V této práci byly prezentovány dva modely, které dále pomáhají zpřesnit odhad výdělku ZEVO, za použití statisticky posbíraných dat o poptávce po teple za předchozí roky. Například i pomocí těchto nástrojů pak lze vytvořit kvalitní technické podklady pro výstavbu nových ZEVO, a přispět tak k přiklonění ekonomiky k modelu trvale udržitelného rozvoje a většího zájmu o životní prostředí.

LITERATURA

- [1] Produkce, využití a odstranění odpadů. Praha: Český statistický úřad, 2016, 2016(1), 43 s. 280020-16. Dostupné také z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2015>.
- [2] Odpad je energie [online]. Praha: STEO, c2017 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.odpadjeenergie.cz/>.
- [3] EU, Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic, Dostupné také z <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>.
- [4] ČESKO, Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů, In: Sbíрка zákonů. Praha: Sagit, 2001, ročník 2001, částka 71, číslo 185. Dostupné také z: <http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/>.
- [5] BRUNNER, P. H. Cycles, spirals and linear flows Sage journals, 2013, 31, 2, Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0734242X13501152>.
- [6] Hand in hand with Recycling. CEWEP [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.cewep.eu/information/recycling/index.html>.
- [7] ČESKO: Státní energetická koncepce, Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2015. Dostupné z: URL <https://www.mpo.cz/dokument158059.html>.
- [8] ČESKO, Zákon o ochraně ovzduší, In: Sbíрка zákonů. Praha: Sagit, 2012, ročník 2012, částka 69, číslo 201. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=201&r=2012>.
- [9] ČESKO. Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: Sbíрка zákonů. Praha: Sagit, 2012, ročník 2012, částka 151, číslo 415. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=415&r=2012>.
- [10] ČESKO. Vyhláška o katalogu odpadů. In: Sbíрка zákonů. Praha: Sagit, 2016, ročník 2016, částka 38, číslo 93. Dostupné také z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=93&r=2016>.
- [11] Lidé v Arnice - Arnika. Hlavní stránka - Arnika [online]. Copyright © 2014 Arnika [cit. 28.04.2017]. Dostupné z: <http://arnika.org/odpady-5>.
- [12] EU. NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 1013/2006 ze dne 14. června 2006 o přepravě odpadů. In: . ročník 2006. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/1013/oj>.
- [13] EU, SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích, Dostupné také z: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:CS:PDF>.
- [14] EU, Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/76/ES ze dne 4. prosince 2000 o spalování odpadů, Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/76/oj>.

LITERATURA

- [15] KADRNOŽKA, Jaroslav a Ladislav OCHRANA. Teplárenství. 1. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-720-4222-X.
- [16] PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [17] Dálkové vytápění [Naše teplo] [online] [cit. 18.03.2017]. Dostupné z: <http://www.naseteplo.cz/>.
- [18] Výhody kombinované výroby. Kombinovaná výroba - efektivní a ekologické využití paliva [online]. Teplárenské sdružení České republiky [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.kombinovana-vyroba.cz/?id=05&1494274056>.
- [19] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ, Jiří MOSKALÍK a . Kotle – 2. část. TZB-info [online]. 2012 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>.
- [20] Skladba,[Komunální odpad] [online]. Copyright © 2017 STEO [cit. 09.04.2017]. Dostupné z: <http://www.komunalniodpad.eu/?str=skladba>.
- [21] MŽP. Analýza potenciálu energetického využití odpadů v ČR včetně ekonomického a regionálního vyhodnocení. Praha, 2015.
- [22] BALÁŠ, Marek, Zdeněk SKÁLA a Martin LISÝ. Spalovny odpadu – odpad jako palivo. TZB-info [online]. 2014(10) [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/energie-z-odpadu/11897-spalovny-odpadu-odpad-jako-palivo>.
- [23] Teoretická část. Publi.cz [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/170/04.html>.
- [24] BERÁNEK, Josef a kol.: Inženýrské sítě (stud. opora). Brno: VUT v Brně, FAST, 2005. (CS).
- [25] Zásady návrhu a montáže potrubních systémů z nerezové oceli. TZB-info [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://voda.tzb-info.cz/potrubni-trasy-vodovod/3149-zasady-navrhu-a-montaze-potrubnich-systemu-z-nerezove-oceli>.
- [26] TUČEK, J. Výpočet tepelných ztrát a izolace potrubí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 68 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Bohuslav Kilkovský, Ph.D..
- [27] Parní a teplovodní topné systémy. Naše návody [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.nasenavody.cz/technicke-zarizeni/parni-a-teplovodni-topne-systemy>.
- [28] KAŠÍK, Zbyněk. Má pára budoucnost? II. TZB-info [online]. 2002, 2002 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/986-ma-para-budoucnost-ii>.
- [29] KOTRBATÝ, Miroslav a Ondřej HOFER. Předávací stanice tepla ve vodních soustavách CZT (I): Vstupní stanice u odběratele a tlakově závislé připojení spotřebičů tepla. TZB-info [online]. 2008 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/4848-predavaci-stance-tepla-ve-vodnich-soustavach-czt-i>.

- [30] ZAJÍČEK, Miroslav a kolektiv. Studie stavu teplárenství. Národohospodářská fakulta Vysoká škola ekonomická, 2011. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz//dokument85256.html>.
- [31] YOON, Taeyeon, Younsun MA a Charles RHODES. Individual Heating systems vs. District Heating systems: What will consumers pay for convenience? Energy policy. 1973-,2015(86), 73-81. ISSN 0301-4215.
- [32] PUTNA, Ondřej, František JANOSTÁK, Radovan ŠOMPLÁK a Martin PAVLAS. Short-time Fluctuations and Their Impact on Waste-to-Energy: Conceptual Design Optimized by Multi-stage Stochastic Model. Chemical Engineering transactions. AIDIC, 2017, 2017(61). ISSN 2283-9216.
- [33] FERDAN, Tomáš a kol . A waste-to-energy project: A complex approach towards the assessment of investment risks. Applied Thermal Engineering. Elsevier, 2015, 2015(89), 1127-1136. ISSN 1359-4311.
- [34] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 4/2012 ze dne 26.11.2012, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie. Energetický regulační věstník. Částka 8/2012.
- [35] Ceník. SAKO Brno [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.sako.cz/stranka/cz/261/cenik/>.
- [36] Vyhodnocení cen tepelné energie a jejich vývoj k 1. lednu 2016. In: Energetický regulační úřad [online]. ČESKO, 2016 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/teplo/statistika/vyhodnoceni-cen-tepelne-energie>.
- [37] ČESKO, Zákon České národní rady o místních poplatcích, In: Sběrka zákonů. Praha: Sagit, 1991, ročník 1990, částka 92, číslo 565. Dostupné také z: <http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?r=1990&cz=565>.
- [38] ŠOMPLÁK, Radovan. Logistic model-based tool for policy-making towards sustainable waste management. Clean Technologies and Environmental Policy. Springer, 2014, 2014(16), 1275-1286. DOI: 10.1007/s10098-014-0744-5. ISSN 1618-954X.
- [39] Analýza možností energetického využívání odpadů v kraji Vysočina. Jihlava: Energetická agentura vysočiny, 2014., Dostupné z: <http://www.kr-vysocina.cz/analyza-moznosti-energetickeho-vyuzivani-odpadu-v-kraji-vysocina/d-4058561>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| Zkratka | Celý název |
|----------------|---|
| EVO | Energetické využití odpadu |
| ZEVO | Zařízení pro energetické využití odpadu |
| Sb | Sbírka zákonů |
| KO | Komunální odpad |
| SKO | Směsný komunální odpad |
| EU | Evropská unie |
| CZT | Centralizované zásobování teplem |
| SCZT | Sít' centralizovaného zásobování teplem |
| CHP | Combined heat and power |
| KVET | Kombinovaná výroba elektřiny a tepla |
| PT | Parní protitlaková turbína |
| KOT | Kondenzační odběrová turbína |
| TZL | Tuhé znečišťující látky |
| HU | Hnědé uhlí |
| PS | Předávací stanice |
| TUV | Teplá užitková voda |
| DPH | Daň z přidané hodnoty |
| ÚPI | Ústav procesního inženýrství |